

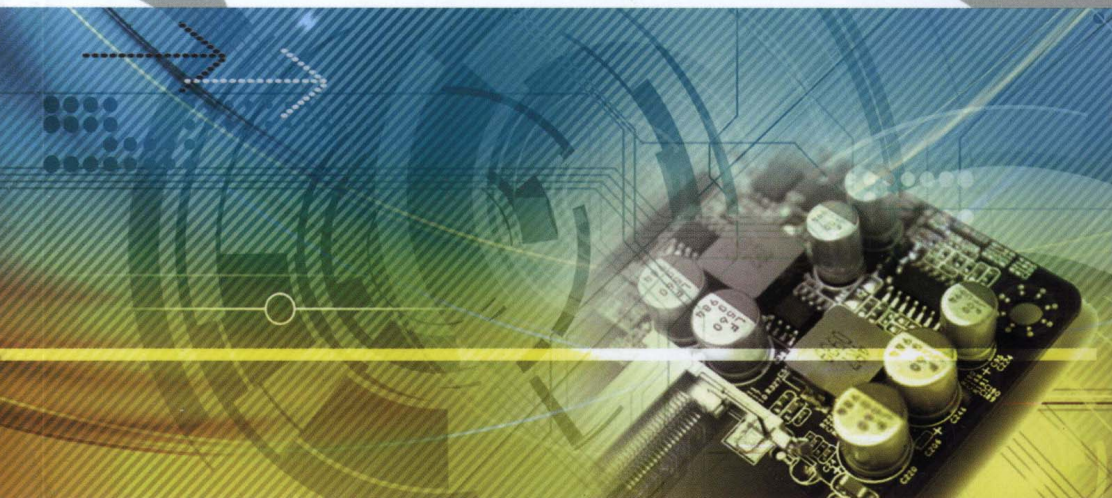
电子元器件选用

DIANZI YUANQIJIAN XUANYONG

轻松入门

蔡杏山 主编

QINGSONG RUMEN



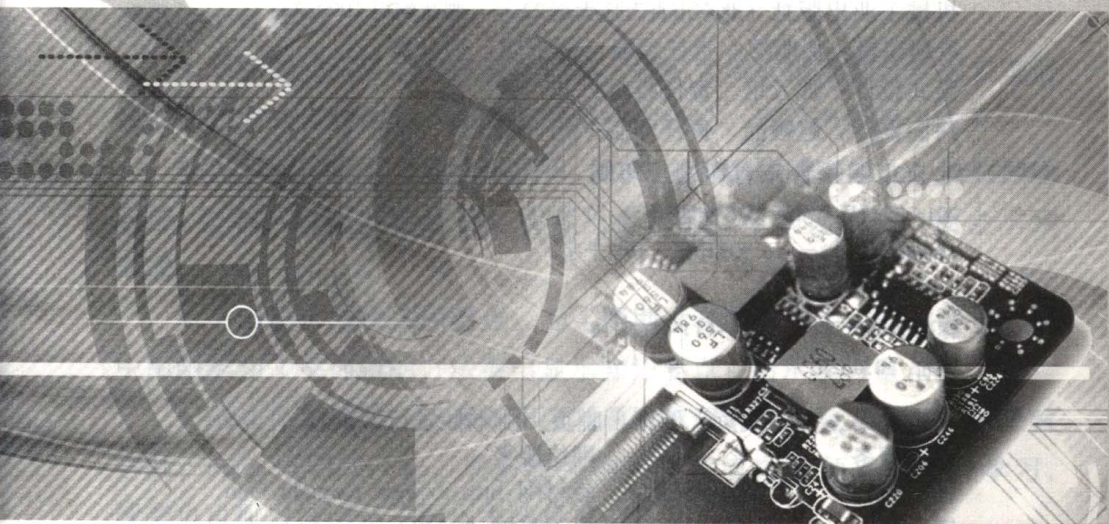
电子元器件选用

DIANZI YUANQIJIAN XUANYONG

轻松入门

蔡杏山 主编

QINGSONG RUMEN



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书是一本介绍电子元器件特点、参数和选用的图书，主要内容有电阻器、电容器、电感器、变压器、二极管、晶体管、光电器件、电声器件、显示器件、晶闸管、场效应晶体管、IGBT、继电器、干簧管、贴片元器件和集成电路等。

本书基础起点低、语言通俗易懂、内容图文并茂且循序渐进，读者只要有初中文化程度，就能通过阅读本书而轻松掌握电子元器件的选择与使用。

本书适合作为电子爱好者学习电子元器件选用的图书，也适合作职业院校电类专业学习电子元器件选用的教材。

图书在版编目（CIP）数据

电子元器件选用轻松入门/蔡杏山主编. —北京：机械工业出版社，2013.10

ISBN 978-7-111-44391-9

I. ①电… II. ①蔡… III. ①电子元件—基本知识②电子器件—基本知识 IV. ①TN6

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 244642 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：徐明煜 责任编辑：徐明煜 朱 林

版式设计：常天培 责任校对：张 薇

封面设计：赵颖喆 责任印制：杨 曦

北京市四季青双青印刷厂印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

148mm×210mm·6.375 印张·197 千字

0001—4000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-44391-9

定价：20.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社 服 务 中 心：(010)88361066

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部：(010)68326294

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部：(010)88379649

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前言

电子技术在社会上应用无处不在，根据应用领域不同，电子技术可分为家庭消费电子、通信电子、机械电子、医疗电子、汽车电子、电脑及数码电子和国防科技电子等，随着社会的不断发展，电子技术应用领域还在增加。电子元器件是任何领域的电子技术的基础，任何电子产品都是由一个个电子元器件组成的，掌握了电子元器件知识，也就掌握了电子技术的根本。

为了让初学者能轻松快速掌握电子元器件实用知识，我们推出了《电子元器件选用轻松入门》这本图书。本书主要有以下特点：

- ◆ 基础起点低。读者只需具有初中文化程度即可阅读本书。
- ◆ 语言通俗易懂。书中少用专业化的术语，遇到较难理解的内容用形象比喻说明，尽量避免复杂的理论分析和烦琐的公式推导，阅读起来感觉会十分轻松。
- ◆ 采用图文并茂的方式表现内容。书中大多采用读者喜欢的直观形象的图表方式表现内容，使阅读变得非常轻松，不易产生阅读疲劳。
- ◆ 内容安排符合人的认识规律。在图书内容顺序安排上，按照循序渐进、由浅入深的原则进行，读者只需从前往后阅读图书，便会水到渠成。
- ◆ 突出显示书中知识要点。为了帮助读者掌握书中的知识要点，书中用阴影和文字加粗的方法突出显示知识要点，指示学习重点。
- ◆ 网络免费辅导。读者在阅读时遇到难理解的问题，可登录易天教学网：www.eTV100.com，观看有关辅导材料或向老师提问进行学习，读者也可以在该网站了解本书的新书信息。

本书由蔡杏山主编。在编写过程中得到了许多教师的支持，其中蔡玉山、詹春华、黄勇、何慧、黄晓玲、蔡春霞、邓艳姣、刘凌云、

电子元器件选用轻松入门

刘海峰、刘元能、邵永亮、蔡理峰、朱球辉、何彬、蔡任英和邵永明等参与了部分章节的编写工作，在此一致表示感谢。由于我们水平有限，书中的错误和疏漏在所难免，望广大读者和同仁予以批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 电阻器	1
1.1 固定电阻器	1
1.1.1 外形与符号	1
1.1.2 功能	1
1.1.3 标称阻值	2
1.1.4 标称阻值系列	5
1.1.5 额定功率	6
1.1.6 选用	8
1.1.7 种类	9
1.1.8 电阻器的型号命名方法	10
1.2 电位器	12
1.2.1 外形与符号	12
1.2.2 结构与原理	12
1.2.3 应用	13
1.2.4 种类	14
1.2.5 主要参数	16
1.2.6 选用	17
1.3 敏感电阻器	17
1.3.1 热敏电阻器	17
1.3.2 光敏电阻器	19
1.3.3 压敏电阻器	21
1.3.4 湿敏电阻器	23
1.3.5 气敏电阻器	24
1.3.6 力敏电阻器	26
1.3.7 敏感电阻器的型号命名方法	27
1.4 排阻	30



1.4.1 实物外形	30
1.4.2 命名方法	30
1.4.3 类型及内部电路结构	31
第2章 电容器	33
2.1 固定电容器	33
2.1.1 结构、外形与符号	33
2.1.2 主要参数	33
2.1.3 性质	34
2.1.4 极性	38
2.1.5 种类	39
2.1.6 串联与并联	41
2.1.7 容量与误差的标注方法	43
2.1.8 选用	45
2.1.9 电容器的型号命名方法	46
2.2 可变电容器	47
2.2.1 微调电容器	47
2.2.2 单联电容器	48
2.2.3 多联电容器	48
第3章 电感器与变压器	50
3.1 电感器	50
3.1.1 外形与符号	50
3.1.2 主要参数与标注方法	50
3.1.3 性质	52
3.1.4 种类	55
3.1.5 选用	56
3.1.6 电感器的型号命名方法	57
3.2 变压器	58
3.2.1 外形与符号	58
3.2.2 结构、原理和功能	58
3.2.3 特殊绕组变压器	60
3.2.4 种类	61
3.2.5 主要参数	63

3.2.6 选用	64
3.2.7 变压器的型号命名方法	65
第4章 二极管	66
4.1 半导体和普通二极管	66
4.1.1 半导体	66
4.1.2 二极管	67
4.1.3 整流二极管与整流桥	71
4.1.4 开关二极管	73
4.1.5 二极管的型号命名方法	75
4.2 稳压二极管	76
4.2.1 外形与符号	76
4.2.2 工作原理	77
4.2.3 应用	78
4.2.4 主要参数	78
4.2.5 选用	79
4.3 变容二极管	79
4.3.1 外形与符号	79
4.3.2 工作原理	79
4.3.3 容量变化规律	81
4.3.4 主要参数	81
4.4 双向触发二极管	83
4.4.1 外形与符号	83
4.4.2 性质	83
4.4.3 特性曲线	84
4.5 肖特基二极管	85
4.5.1 外形与符号	85
4.5.2 特点及应用场合	85
4.5.3 常用肖特基二极管的主要参数	86
4.6 快恢复二极管	86
4.6.1 外形与符号	86
4.6.2 特点及应用场合	86
4.6.3 常用快恢复二极管的主要参数	87



4.7 瞬态电压抑制二极管	87
4.7.1 外形与符号	87
4.7.2 性质	88
4.7.3 选用	89
第5章 晶体管	90
5.1 普通晶体管	90
5.1.1 外形与符号	90
5.1.2 结构	90
5.1.3 电流、电压规律	92
5.1.4 放大原理	94
5.1.5 3种状态说明	96
5.1.6 主要参数	101
5.1.7 中小功率晶体管的选用	102
5.1.8 大功率晶体管的选用	103
5.1.9 晶体管的型号命名方法	103
5.2 特殊晶体管	104
5.2.1 带阻晶体管和带阻尼晶体管	104
5.2.2 达林顿晶体管	105
第6章 光电器件	107
6.1 发光二极管	107
6.1.1 普通发光二极管	107
6.1.2 双色发光二极管	109
6.1.3 三原色发光二极管	110
6.1.4 闪烁发光二极管	112
6.1.5 红外线发光二极管	113
6.1.6 发光二极管的型号命名方法	114
6.2 光敏二极管	115
6.2.1 普通光敏二极管	115
6.2.2 红外线接收二极管	117
6.2.3 红外线接收组件	117
6.3 光敏晶体管	119
6.3.1 外形与符号	119

6.3.2 性质	120
6.3.3 光敏二极管和光敏晶体管的选用	120
6.4 光耦合器	121
6.4.1 外形与符号	121
6.4.2 工作原理	121
6.5 光遮断器	122
6.5.1 外形与符号	122
6.5.2 工作原理	122
第7章 电声器件	124
7.1 扬声器	124
7.1.1 外形与符号	124
7.1.2 种类与工作原理	124
7.1.3 主要参数	125
7.1.4 选用	126
7.1.5 扬声器的型号命名方法	126
7.2 耳机	127
7.2.1 外形与符号	127
7.2.2 种类与工作原理	127
7.2.3 选用	129
7.3 蜂鸣器	129
7.3.1 外形与符号	129
7.3.2 种类及结构原理	130
7.3.3 有源和无源蜂鸣器的区别	130
7.3.4 选用	131
7.4 传声器	131
7.4.1 外形与符号	131
7.4.2 工作原理	132
7.4.3 主要参数	133
7.4.4 种类	133
7.4.5 选用	134
7.4.6 电声器件的型号命名方法	135



第 8 章 显示器件	137
8.1 LED 数码管与 LED 点阵显示器	137
8.1.1 1 位 LED 数码管	137
8.1.2 多位 LED 数码管	139
8.1.3 LED 点阵显示器	141
8.2 真空荧光显示器	145
8.2.1 外形	145
8.2.2 结构与工作原理	145
8.3 液晶显示屏	147
8.3.1 笔段式液晶显示屏	148
8.3.2 点阵式液晶显示屏	150
第 9 章 晶闸管	153
9.1 单向晶闸管	153
9.1.1 实物外形与符号	153
9.1.2 结构原理	153
9.1.3 主要参数	155
9.1.4 选用	156
9.1.5 晶闸管的型号命名方法	156
9.2 门极关断晶闸管	157
9.2.1 外形、结构与符号	157
9.2.2 工作原理	158
9.3 双向晶闸管	158
9.3.1 符号与结构	158
9.3.2 工作原理	159
第 10 章 场效应晶体管与 IGBT	161
10.1 结型场效应晶体管	161
10.1.1 外形与符号	161
10.1.2 结构与原理	161
10.1.3 主要参数	163
10.1.4 场效应晶体管的型号命名方法	164
10.2 绝缘栅型场效应晶体管	164
10.2.1 增强型 MOS 管	164

10.2.2	耗尽型 MOS 管	167
10.2.3	场效应晶体管的选用	168
10.3	绝缘栅双极型晶体管	169
10.3.1	外形、结构与符号	169
10.3.2	工作原理	169
第 11 章	继电器与干簧管	171
11.1	继电器	171
11.1.1	外形与符号	171
11.1.2	结构与应用	171
11.1.3	主要参数	172
11.1.4	选用	173
11.1.5	继电器的型号命名方法	173
11.2	干簧管与干簧管继电器	174
11.2.1	外形与符号	174
11.2.2	工作原理	175
11.2.3	选用	176
11.2.4	应用	176
第 12 章	贴片元器件与集成电路	177
12.1	贴片元器件	177
12.1.1	贴片电阻器	177
12.1.2	贴片电容器	180
12.1.3	贴片电感器	182
12.1.4	贴片二极管	182
12.1.5	贴片晶体管	183
12.2	集成电路	184
12.2.1	简介	184
12.2.2	特点	185
12.2.3	种类	186
12.2.4	引脚识别	187
12.2.5	集成电路的型号命名方法	188
附录	常用晶体管的性能参数及用途	190

第 1 章

电 阻 器

1.1 固定电阻器

电阻器是电子电路中最常用的元器件之一，简称电阻。电阻器种类很多，通常可以分为三类：固定电阻器、电位器和敏感电阻器。

1.1.1 外形与符号

固定电阻器是一种阻值固定不变的电阻器。固定电阻器的实物外形和电路符号如图 1-1 所示，在图 1-1b 中，上方为电阻器的国标符号，下方为国外常用的电阻器符号（在一些国外技术资料常见）。

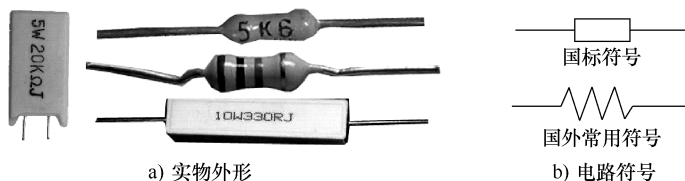


图 1-1 固定电阻器

1.1.2 功能

固定电阻器的主要功能有降压限流、分流和分压。固定电阻器的功能说明如图 1-2 所示。

1. 降压限流

在图 1-2a 中，电阻器 R_1 与灯泡串联，如果用导线直接代替 R_1 ，加到灯泡两端的电压有 6V，流过灯泡的电流很大，灯泡将会很亮，串联电阻 R_1 后，由于 R_1 上有 2V 电压，灯泡两端的电压就被降低到 4V，同时由于 R_1 对电流有阻碍作用，流过灯泡的电流也就减小。电阻器 R_1 在

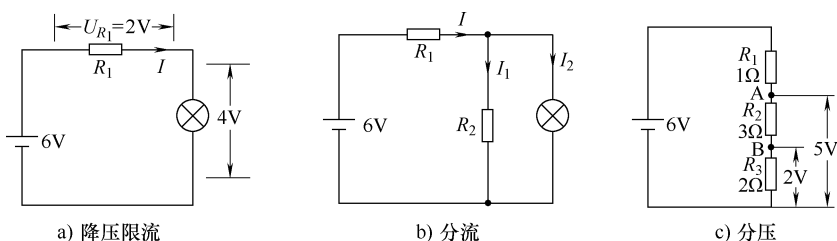


图 1-2 固定电阻器的功能说明

这里就起着降压、限流功能。

2. 分流

在图 1-2b 中，电阻器 R_2 与灯泡并联在一起，流过 R_1 的电流 I 除了一部分流过灯泡外，还有一路经 R_2 流回到电源，这样流过灯泡的电流减小，灯泡变暗。 R_2 的这种功能称为分流。

3. 分压

在图 1-2c 中，电阻器 R_1 、 R_2 和 R_3 串联在一起，从电源正极出发，每经过一个电阻器，电压会降低一次，电压降低多少取决于电阻器阻值的大小，阻值越大，电压降低越多，图中的 R_1 、 R_2 和 R_3 将 6V 电压分成 5V 和 2V 的电压。

1.1.3 标称阻值

为了表示阻值的大小，电阻器在出厂时会在表面标注阻值。标注在电阻器上的阻值称为标称阻值。电阻器的实际阻值与标称阻值往往有一定的差距，这个差距称为偏差。电阻器标称阻值和偏差的标注方法主要有直标法和色环法。

1. 直标法

直标法是指用文字符号（数字和字母）在电阻器上直接标注出阻值和偏差的方法。直标法的阻值单位有欧姆（简称为欧， Ω ）、千欧（ $k\Omega$ ）和兆欧（ $M\Omega$ ）。

（1）偏差表示方法 直标法表示偏差一般采用两种方式：一是用罗马数字 I、II、III 分别表示偏差为 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ ，如果不标注偏差，则偏差为 $\pm 20\%$ ；二是用字母来表示，各字母对应的偏差见表 1-1，如 J、K 分别表示偏差为 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 。

表 1-1 字母对应的允许偏差

字 母	B	C	D	F	G	J	K	M	N
允许偏差（%）	±0.1	±0.25	±0.5	±1	±2	±5	±10	±20	±30

(2) 直标法常见的表示形式

直标法形式一：用“数值+单位+偏差”表示 12kΩ±10% 12kΩ10% 12kΩⅡ 12kΩK 阻值均为12kΩ、偏差均为±10%	左图四个电阻的偏差表示形式不同，但都表示阻值为12kΩ，偏差为±10%
直标法形式二：用单位代表小数点表示 1k2 1.2kΩ 3M3 3.3MΩ 3R3 3.3Ω R33 0.33Ω	电阻器上的1k2表示1.2kΩ，3M3表示3.3MΩ，3R3（或3Ω3）表示3.3Ω，R33（或Ω33）表示0.33Ω
直标法形式三：用“数值+单位”表示 12kΩ 12k 阻值均为12kΩ、偏差为±20%	这种标注法没标出偏差，表示偏差为±20%，左图中的电阻器的阻值都为12kΩ，偏差为±20%
直标法形式四：用数字直接表示 12 12Ω 120 120Ω	一般1kΩ以下的电阻采用这种形式，左图中的两个电阻采用这种表示方式，12表示12Ω，120表示120Ω

2. 色环法

色环法是指在电阻器上标注不同颜色圆环来表示阻值和偏差的方法。图 1-3 中的两个电阻器就采用了色环法来标注阻值和偏差，其中一只电阻器上有四条色环，称为四环电阻器，另一只电阻器上有五条色环，称为五环电阻器，五环电阻器的阻值精度较四环电阻器更高。



图 1-3 色环电阻器

(1) 色环含义 要正确识读色环电阻器的阻值和偏差，必须先了解各种色环代表的意义。四环色环电阻器各色环代表的意义见表 1-2。

表 1-2 四环色环电阻器各色环颜色代表的意义及数值

色 环 颜 色	第一环 (有效数)	第二环 (有效数)	第三环 (倍乘数)	第四环 (偏差数)
棕	1	1	$\times 10^1$	$\pm 1\%$
红	2	2	$\times 10^2$	$\pm 2\%$
橙	3	3	$\times 10^3$	
黄	4	4	$\times 10^4$	
绿	5	5	$\times 10^5$	$\pm 0.5\%$
蓝	6	6	$\times 10^6$	$\pm 0.2\%$
紫	7	7	$\times 10^7$	$\pm 0.1\%$
灰	8	8	$\times 10^8$	
白	9	9	$\times 10^9$	
黑	0	0	$\times 10^0 = 1$	
金				$\pm 5\%$
银				$\pm 10\%$
无色环				$\pm 20\%$

(2) 四环电阻器的识读 四环电阻器阻值与偏差的识读如图 1-4 所示。四环电阻器的识读具体过程如下：

第一步：判别色环排列顺序。

四环电阻器的色环顺序判别规律有：

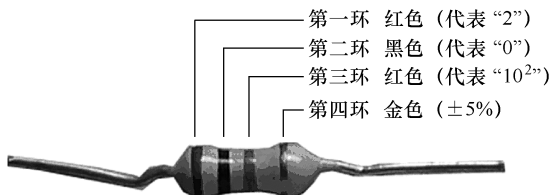
1) 四环电阻器的第四条色环为偏差数环，一般为金色或银色，因此如果靠近电阻器一个引脚的色环颜色为金色或银色，该色环必为第四

环，从该环向另一引脚方向排列的三条色环顺序依次为三、二、一。

2) 对于色环标注标准的电阻器，一般第四环与第三环间隔较远。

第二步：识读色环。

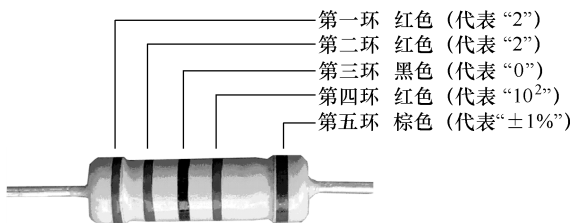
按照第一、二环为有效数环，第三环为倍乘数环，第四环为偏差数环，再对照表 1-2 各色环代表的数字识读出色环电阻器的阻值和偏差。



标称阻值为 $20 \times 10^2 \Omega (\pm 5\%) = 2\text{k}\Omega (95\% \sim 105\%)$

图 1-4 四环电阻器阻值和偏差的识读

(3) 五环电阻器的识读 五环电阻器阻值与偏差的识读方法与四环电阻器基本相同，不同在于五环电阻器的第一、二、三环为有效数环，第四环为倍乘数环，第五环为偏差数环。另外，五环电阻器的偏差数环颜色除了有金、银色外，还可能是棕、红、绿、蓝和紫色。五环电阻器阻值和偏差的识读如图 1-5 所示。



标称阻值为 $220 \times 10^2 \Omega (\pm 1\%) = 22\text{k}\Omega (99\% \sim 101\%)$

图 1-5 五环电阻器阻值和偏差的识读

1.1.4 标称阻值系列

电阻器是由厂家生产出来的，但厂家是不能随意生产任何阻值的电阻器。为了生产、选购和使用的方便，国家规定了电阻器阻值的系列标称值，该标称值包括 E-24、E-12 和 E-6 三个系列，具体见表 1-3。

国家标准规定，生产某系列的电阻器，其标称阻值应等于该系列中标称值的 10^n (n 为正整数) 倍。如 E-24 系列的偏差等级为 I，允许偏差为 $\pm 5\%$ ，若要生产 E-24 系列（允许偏差为 $\pm 5\%$ ）的电阻器，厂家可以生产标称阻值为 1.3Ω 、 13Ω 、 130Ω 、 $1.3k\Omega$ 、 $13k\Omega$ 、 $130k\Omega$ 、 $1.3M\Omega$ …的电阻器，而不会生产标称阻值是 1.4Ω 、 14Ω 、 140Ω …的电阻器。

表 1-3 电阻器的标称阻值系列

标称阻值系列	允许偏差 (%)	偏差等级	标 称 值
E-24	± 5	I	1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.7, 3.0, 3.3, 3.6, 3.9, 4.3, 4.7, 5.1, 5.6, 6.2, 6.8, 7.5, 8.2, 9.1
E-12	± 15	II	1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.2, 2.7, 3.3, 3.9, 4.7, 5.6, 6.8, 8.2
E-6	± 20	III	1.0, 1.5, 2.2, 3.3, 4.7, 6.8

1.1.5 额定功率

额定功率是指在一定的条件下元件长期使用允许承受的最大功率。电阻器额定功率越大，允许流过的电流越大。固定电阻器的额定功率也要按国家标准进行标注，其标称系列有 $1/8W$ 、 $1/4W$ 、 $1/2W$ 、 $1W$ 、 $2W$ 、 $5W$ 和 $10W$ 等。小电流电路一般采用功率为 $1/8 \sim 1/2W$ 的电阻器，而大电流电路中常采用 $1W$ 以上的电阻器。

电阻器额定功率识别方法如下：

1) 对于标注了功率的电阻器，可根据标注的功率值来识别功率大小。图 1-6 中的电阻器标注的额定功率值为 $10W$ ，阻值为 330Ω ，偏差为 $\pm 5\%$ 。



功率10W 阻值330Ω 偏差±5%

图 1-6 根据标注识别功率

2) 对于没有标注功率的电阻器，可根据长度和直径来判别其功率大小。长度和直径值越大，功率越大，图 1-7 中的一大一小两个色环电阻器，大电阻的功率更大。电阻器的长度、直径与功率对应关系可参见表 1-4。例如一个长度为 10.8mm、直径为 4.2mm 的金属膜电阻器，其功率为 0.25W。



图 1-7 根据体积大小来判别功率

表 1-4 电阻器的长度、直径与功率对照表

额定功率/W	碳膜电阻器 (RT)		金属膜电阻器 (RJ)	
	长度/mm	直径/mm	长度/mm	直径/mm
1/8	11	3.9	6 ~ 8	2 ~ 2.5
1/4	18.5	5.5	7 ~ 8.3	2.5 ~ 2.9
1/2	28	5.5	10.8	4.2
1	30.5	7.2	13.0	6.6
2	48.5	9.5	18.5	8.6

3) 在电路图中，为了表示电阻器的功率大小，一般会在电阻器符号上标注一些标志。电阻器上标注的标志与对应功率值如图 1-8 所示，1W 以下用线条表示，1W 以上的直接用数字表示功率大小（旧标准用罗马数字表示）。

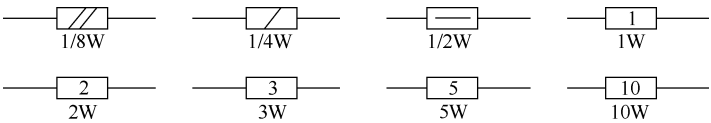


图 1-8 电路图中电阻器的功率标志



1.1.6 选用

电子元器件的选用是学习电子技术一个重要的内容。在选用元器件时，不同技术层次的人考虑问题不同，从事电子产品研发的人员需要考虑元器件很多参数，这样才能保证生产出来的电子产品性能好，并且不易出现问题，而对大多数从事维修、制作和简单设计的电子爱好者来说，只要考虑元器件的一些重要参数就可以解决实际问题。本书中介绍的各种元器件的选用方法主要是针对广大初、中级电子技术人员。

1. 选用举例

在选用电阻器时，主要考虑电阻器的阻值、偏差、额定功率和极限电压。

(1) 选择要求 在图 1-9 中，要求通过电阻器 R 的电流 $I=0.01\text{A}$ ，请选择合适的电阻器来满足电路实际要求。

(2) 选择过程 电阻器的选用过程如下：

1) 确定阻值。用欧姆定律可求出电阻器的阻值 $R=U/I=220\text{V}/0.01\text{A}=22000\Omega=22\text{k}\Omega$ 。

2) 确定偏差。对于电路来说，偏差越小越好，这里选择电阻器偏差为 $\pm 5\%$ ，若难以找到偏差为 $\pm 5\%$ 的电阻器，也可选择偏差为 $\pm 10\%$ 的电阻器。

3) 确定功率。根据功率计算公式可求出电阻器的功率大小为 $P=I^2R=(0.01\text{A})^2\times 22000\Omega=2.2\text{W}$ ，为了让电阻器能长时间使用，选择的电阻器功率应在实际功率的两倍以上，这里选择电阻器功率为 5W 。

4) 确定被选电阻器的极限电压是否满足电路需要。当电阻器用在高电压、小电流的电路时，可能功率满足要求，但电阻器的极限电压小于电路加到它两端的电压，电阻器会被击穿。

电阻器的极限电压可用 $U=\sqrt{PR}$ 来求，这里的电阻器极限电压 $U=\sqrt{5\times 22000}\approx 331\text{V}$ ，该值大于两端所加的 220V 电压，故可正常使用。当电阻器的极限电压不够时，为了保证电阻器在电路中不被击穿，可根据情况选择阻值更大或功率更大的电阻器。

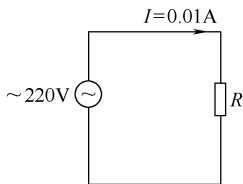


图 1-9 电阻器选用示例

综上所述，为了让图 1-9 所示电路中电阻器能正常工作并满足要求，应选择阻值为 $22\text{k}\Omega$ 、偏差为 $\pm 5\%$ 、额定功率为 5W 的电阻器。

2. 电阻器选用技巧

在实际工作中，经常会遇到所选择的电阻器无法与要求一致，这时可按下面方法解决：

1) 对于要求不高的电路，在选择电阻器时，其阻值和功率应与要求值尽量接近，并且额定功率只能大于要求值，若小于要求值，电阻器容易被烧坏。

2) 若无法找到某个阻值的电阻器，可采用多个电阻器并联或串联的方式来解决。电阻器串联时阻值增大，并联时阻值减小。

3) 若某个电阻器功率不够，可采用多个大阻值的小功率电阻器并联，或采用多个小阻值小功率的电阻器串联，不管是采用并联还是串联，每个电阻器承受的功率都会变小。至于每个电阻器应选择多大功率，可用 $P = U^2/R$ 或 $P = I^2R$ 来计算，再考虑两倍左右的余量。

在图 1-9 中，如果无法找到 $22\text{k}\Omega$ 、 5W 的电阻器，可用两个 $44\text{k}\Omega$ 的电阻器并联来充当 $22\text{k}\Omega$ 的电阻器，由于这两个电阻器阻值相同，并联在电路中消耗功率也相同，单个电阻器在电路中承受功率 $P = U^2/R = 220^2/44000 = 1.1\text{W}$ ，考虑两倍的余量，功率可选择 2.5W ，也就是说将两个 $44\text{k}\Omega$ 、 2.5W 的电阻器并联，可替代一个 $22\text{k}\Omega$ 、 5W 的电阻器。

如果采用两个 $11\text{k}\Omega$ 电阻器串联代替图 1-9 中的电阻器，两个阻值相同的电阻器串联在电路中，它们消耗功率相同，单个电阻器在电路中承受的功率 $P = (U/2)^2/R = 110^2/11000 = 1.1\text{W}$ ，考虑两倍的余量，功率选择 2.5W ，也就是说将两个 $11\text{k}\Omega$ 、 2.5W 的电阻器串联，同样可替代一个 $22\text{k}\Omega$ 、 5W 的电阻器。

1.1.7 种类

电阻器种类很多，根据构成形式不同，通常可以分作碳质电阻器、薄膜电阻器、线绕电阻器和敏感电阻器 4 大类，每大类中又可分几小类。电阻器种类及特点见表 1-5。

表 1-5 电阻器种类及特点

大类	构 成	小 类	特 点
碳质电阻器	用碳质颗粒等导电物质、填料和黏合剂混合制成一个实体的电阻器	无机合成实心碳质电阻器 有机合成实心碳质电阻器	碳质电阻器价格低廉，但其阻值误差、噪声电压都大，稳定性差，目前较少采用
薄膜电阻器	用蒸发的方法将一定电阻率材料蒸镀于绝缘材料表面制成	碳膜电阻器 金属膜电阻器 金属氧化膜电阻器 合成碳膜电阻器 化学沉积膜电阻器 玻璃釉膜电阻器 金属氮化膜电阻	碳膜电阻器成本低、性能稳定、阻值范围宽、温度系数和电压系数低，但承受功率较小，这种电阻器是目前应用最广泛的电阻器 金属膜电阻器比碳膜电阻器的精度高，稳定性好，噪声小，温度系数小，在仪器仪表及通信设备中大量采用 金属氧化膜电阻器高温下稳定，耐热冲击，过载能力强，耐潮湿，但阻值范围比较小 合成碳膜电阻器价格低、阻值范围宽，但噪声大、精度低、频率特性较差，一般用来制作高压、高阻的小型电阻器，主要用在要求不高的电路中 玻璃釉膜电阻器耐潮湿、高温，噪声小，温度系数小，主要应用于厚膜电路
线绕电阻器	用高阻合金线绕在绝缘骨架上制成，外面涂有耐热的釉绝缘层或绝缘漆	通用线绕电阻器 精密线绕电阻器 大功率线绕电阻器 高频线绕电阻器	绕线电阻器具有较低的温度系数，阻值精度高，稳定性好，耐热耐腐蚀，主要做精密大功率电阻使用，缺点是高频性能差，时间常数大

1.1.8 电阻器的型号命名方法

国产电阻器的型号由 4 部分组成（不适合敏感电阻器的命名）。

第一部分用字母表示元件的主称，如：R 表示电阻，W（或 RP）表示电位器。

第二部分用字母表示电阻体的制作材料，如：T—碳膜、H—合成碳膜、S—有机实心、N—无机实心、J—金属膜、Y—氮化膜、C—沉积膜、I—玻璃釉膜、X—线绕。

第三部分用数字或字母表示元件的分类，如：1—普通、2—普通、3—超高频、4—高阻、5—高温、6—精密、7—精密、8—高压、9—特殊、G—高功率、T—可调。

第四部分用数字表示序号。用不同序号来区分同类产品中的不同参数，如元件的外形尺寸和性能指标等。

国产电阻器的型号命名方法具体见表 1-6。

表 1-6 国产电阻器的型号命名方法

第一部分		第二部分		第三部分			第四部分
主 称		材 料		分 类			序 号
符号	含义	符号	含义	符号	含义		一般用数学表示产品的序号，以区分外形尺寸和性能指标
					电阻器	电位器	
R	电阻器	T	碳膜	1	普通	普通	
RP	电位器	J	金属膜	2	普通	普通	
		Y	氧化膜	3	超高频		
		H	合成碳膜	4	高阻		
		S	有机实心	5	高温		
		N	无机实心				
		I	玻璃釉膜	7	精密	精密	
		X	线绕	8	高压	特种函数	
				9	特殊	特殊	
				G	高功率		
				T	可调		
				W		微调	
				D		多圈	

举例：

RJ75 表示精密金属膜电阻器	RT10 表示普通碳膜电阻器
R—电阻器（第一部分）	R—电阻器（第一部分）
J—金属膜（第二部分）	T—碳膜（第二部分）
7—精密（第三部分）	1—普通型（第三部分）
5—序号（第四部分）	0—序号（第四部分）

1.2 电位器

1.2.1 外形与符号

电位器是一种阻值可以通过调节而变化的电阻器，又称可变电阻器。常见电位器的实物外形及电位器的图形符号如图 1-10 所示。

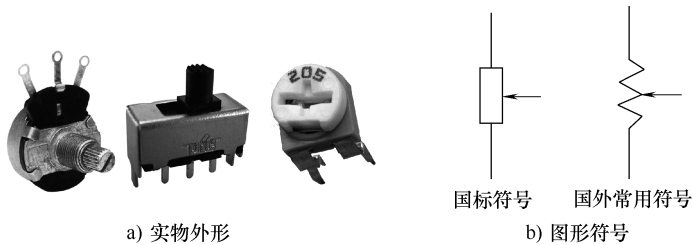


图 1-10 电位器

1.2.2 结构与原理

电位器种类很多，但结构基本相同，电位器的结构示意图如图 1-11 所示。

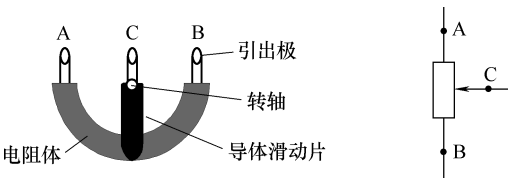


图 1-11 电位器的结构示意图

从图中可看出,电位器有 A、C、B 三个引出极,在 A、B 极之间连接着一段电阻体,该电阻体的阻值用 R_{AB} 表示,对于一个电位器, R_{AB} 的值是固定不变的,该值为电位器的标称阻值, C 极连接一个导体滑动片,该滑动片与电阻体接触, A 极与 C 极之间电阻体的阻值用 R_{AC} 表示, B 极与 C 极之间电阻体的阻值用 R_{BC} 表示, $R_{AC} + R_{BC} = R_{AB}$ 。

当转轴逆时针旋转时,滑动片往 B 极滑动, R_{BC} 减小, R_{AC} 增大;当转轴顺时针旋转时,滑动片往 A 极滑动, R_{BC} 增大, R_{AC} 减小,当滑动片移到 A 极时, $R_{AC} = 0$, 而 $R_{BC} = R_{AB}$ 。

1.2.3 应用

电位器与固定电阻器一样,都具有降压、限流和分流的功能,不过由于电位器具有阻值可调性,故它可随时调节阻值来改变降压、限流和分流的程度。

1. 应用一

在图 1-12a 所示电路中,电位器 RP 的滑动端与灯泡连接,当滑动端向下移动时,灯泡会变暗。灯泡变暗的原因如下:

1) 当滑动端下移时, AC 段的阻体变长, R_{AC} 增大,对电流阻碍大,流经 AC 段阻体的电流减小,从 C 端流向灯泡的电流也随之减少,同时由于 R_{AC} 增大使 AC 段阻体降压增大,加到灯泡两端的电压 U 降低。

2) 当滑动端下移时,在 AC 段阻体变长的同时, BC 段阻体变短, R_{BC} 减小,流经 AC 段的电流除了一路从 C 端流向灯泡时,还有一路经 BC 段阻体直接流回电源负极,由于 BC 段电阻变短,分流增大,使 C 端输出流向灯泡的电流减小。

电位器 AC 段的电阻起限流、降压作用,而 CB 段的电阻起分流作用。

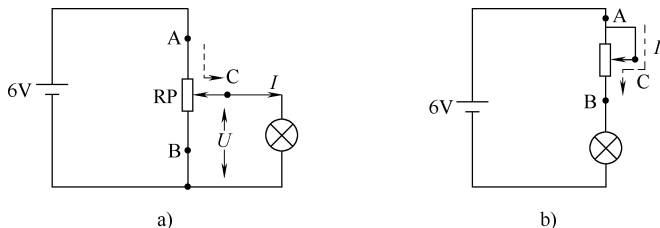


图 1-12 电位器的应用说明图



2. 应用二

在图 1-12b 所示电路中，电位器 RP 的滑动端 C 与固定端 A 连接在一起，由于 AC 段阻体被 A、C 端直接连接的导线短路，电流不会流过 AC 段阻体，而是直接由 A 端经导线到 C 端，再经 CB 段阻体流向灯泡。当滑动端下移时，CB 段的阻体变短， R_{BC} 阻值变小，对电流阻碍小，流过的电流增大，灯泡变亮。

电位器 RP 在该电路中起着降压、限流作用。

1.2.4 种类

电位器种类较多，通常可分为普通电位器、微调电位器、带开关电位器和多联电位器等。

1. 普通电位器

普通电位器一般是指带有调节手柄的电位器，常见有旋转式电位器和直滑式电位器，如图 1-13 所示。

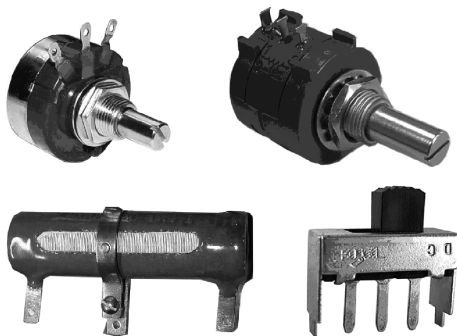


图 1-13 普通电位器

2. 微调电位器

微调电位器又称微调电阻器，通常是指没有调节手柄的电位器，并且不经常调节，如图 1-14 所示。

3. 带开关电位器

带开关电位器是一种将开关和电位器结合在一起的电位器，收音机中调音量兼开关机的部件就是带开关电位器。带开关电位器的实物外形与符号如图 1-15 所示，带开关电位器的电路符号中的虚线表示电位器和开关同轴调节。



图 1-14 微调电位器

从实物外形图可以看出，带开关电位器将开关和电位器连为一体，共同受转轴控制，当转轴顺时针旋到一定位置时，转轴凸起部分顶起开关，E、F间就处于断开状态，当转轴逆时针旋转时，开关依靠弹力闭合，继续旋转转轴时，就开始调节 A、C 和 B、C 间的电阻。

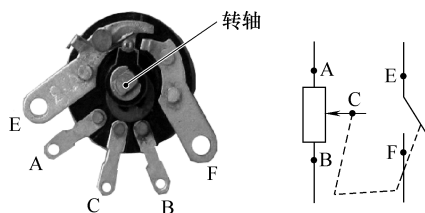


图 1-15 带开关电位器

4. 多联电位器

多联电位器是将多个电位器结合在一起同时调节的电位器。常见的多联电位器实物外形如图 1-16a 所示，从左至右依次是双联电位器、三联电位器和四联电位器，图 1-16b 为双联电位器的图形符号。

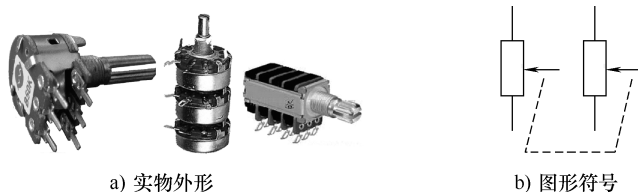


图 1-16 多联电位器



1.2.5 主要参数

电位器的主要参数有标称阻值、额定功率和阻值变化特性。

1. 标称阻值

标称阻值是指电位器上标注的阻值，该值就是电位器两个固定端之间的阻值。与固定电阻器一样，电位器也有标称阻值系列，电位器采用 E-12 和 E-6 系列。电位器有线绕和非线绕两种类型，对于线绕电位器，允许偏差有 $\pm 1\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 5\%$ 和 $\pm 10\%$ ；对于非线绕电位器，允许偏差有 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 和 $\pm 20\%$ 。

2. 额定功率

额定功率是指在一定的条件下电位器长期使用允许承受的最大功率。电位器功率越大，允许流过的电流也越大。

电位器功率也要按国家标称系列进行标注，并且对非线绕和线绕电位器标注有所不同，非线绕电位器的标称系列有 0.025W、0.05W、0.1W、0.25W、0.5W、1W、2W、3W 等，线绕电位器的标称系列有 0.25W、0.5W、1W、1.6W、2W、3W、5W、10W、16W、25W、40W、63W 和 100W 等。从标称系列可以看出，线绕电位器功率可以做得更大。

3. 阻值变化特性

阻值变化特性是指电位器阻值与转轴旋转角度（或触点滑动长度）的关系。根据阻值变化特性不同，电位器可分为直线式（X）、指数式（Z）和对数式（D），三种电位器转角与阻值变化规律如图 1-17 所示。

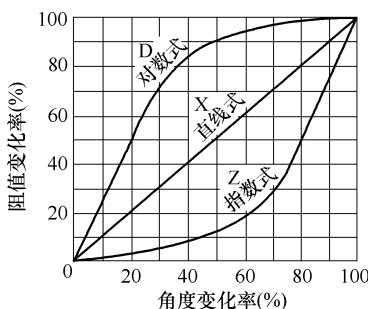


图 1-17 三种电位器转角与阻值变化规律

直线式电位器的阻值与旋转角度呈直线关系，当旋转转轴时，电位器的阻值会匀速变化，即电位器的阻值变化与旋转角度大小成正比。直线式电位器阻体上的导电物质分布均匀，所以具有这种特性。

指数式电位器的阻值与旋转角度呈指数关系，在刚开始转动转轴时，阻值变化很慢，随着转动角度增大，阻值变化很大。指数式电位器的这种性质是因为阻体上的导电物质分布不均匀。指数式电位器通常用在音量调节电路中。

对数式电位器的阻值与旋转角度呈对数关系，在刚开始转动转轴时，阻值变化很快，随着转动角度增大，阻值变化变慢。指数式电位器与对数式电位器性质正好相反，因此常用在与指数式电位器要求相反的电路中，如电视机的音调控制电路和对比度控制电路。

1.2.6 选用

在选用电位器时，主要考虑标称阻值、额定功率和阻值变化特性应与电路要求一致，如果难以找到各方面符合要求的电位器，可按下面的原则用其他电位器替代：

- 1) 标称阻值应尽量相同，若无标称阻值相同的电位器，可以用阻值相近的替代，但标称阻值不能超过要求阻值的 $\pm 20\%$ 。
- 2) 额定功率应尽量相同，若无功率相同的电位器，可以用功率大的电位器替代，一般不允许用小功率的电位器替代大功率电位器。
- 3) 阻值变化特性应相同，若无阻值变化特性相同的电位器，在要求不高的情况下，可用直线式电位器替代其他类型的电位器。
- 4) 在满足上面三点要求外，应尽量选择外形和体积相同的电位器。

1.3 敏感电阻器

敏感电阻器是指阻值随某些外界条件改变而变化的电阻器。敏感电阻器种类很多，常见的有热敏电阻器、光敏电阻器、湿敏电阻器、压敏电阻器、力敏电阻器、气敏电阻器和磁敏电阻器等。

1.3.1 热敏电阻器

热敏电阻器是一种对温度敏感的电阻器，它一般由半导体材料制作

而成，当温度变化时其阻值也会随之变化。

1. 外形与符号

热敏电阻器实物外形和图形符号如图 1-18 所示。

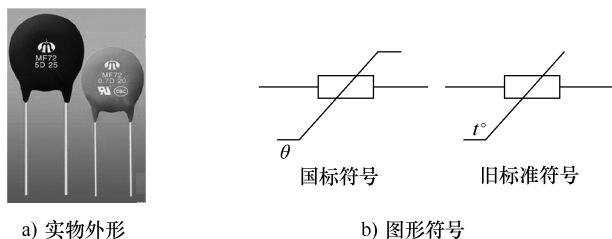


图 1-18 热敏电阻器

2. 种类

热敏电阻器种类很多，通常可分为正温度系数（PTC）热敏电阻器和负温度系数（NTC）热敏电阻器两类。

（1）负温度系数热敏电阻器 负温度系数热敏电阻器简称 **NTC**，其阻值随温度升高而减小。NTC 是由氧化锰、氧化钴、氧化镍、氧化铜和氧化铝等金属氧化物为主要原料制作而成的。根据使用温度条件不同，负温度系数热敏电阻器可分为低温（ $-60 \sim 300^{\circ}\text{C}$ ）、中温（ $300 \sim 600^{\circ}\text{C}$ ）、高温（ $>600^{\circ}\text{C}$ ）三种。

NTC 的温度每升高 1°C ，阻值会减小 $1\% \sim 6\%$ ，阻值减小程度视不同型号而定。NTC 广泛用于温度补偿和温度自动控制电路，如冰箱、空调、温室等温控系统常采用 NTC 作为测温元件。

（2）正温度系数热敏电阻器 正温度系数热敏电阻器简称 **PTC**，其阻值随温度升高而增大。PTC 是在钛酸钡（ BaTiO_3 ）中掺入适量的稀土元素制作而成。

PTC 可分为缓慢型和开关型。缓慢型 PTC 的温度每升高 1°C ，其阻值会增大 $0.5\% \sim 8\%$ 。开关型 PTC 有一个转折温度（又称居里点温度，钛酸钡材料 PTC 的居里点温度一般为 120°C 左右），当温度低于居里点温度时，阻值较小，并且温度变化时阻值基本不变（相当于一个闭合开关），一旦温度超过居里点温度，其阻值会急剧增大（相当于开关断开）。

缓慢型 PTC 常用在温度补偿电路中，开关型 PTC 由于具有开关性

质，常用在开机瞬间接通而后又马上断开的电路中，如彩电的消磁电路和冰箱的压缩机起动电路就用到开关型 PTC。

3. 应用

热敏电阻器具有阻值随温度变化而变化的特点，一般用在与温度有关的电路中。

(1) NTC 的应用 在图 1-19a 中， R_2 (NTC) 与灯泡相距很近，当开关 S 闭合后，流过 R_1 的电流分作两路，一路流过灯泡，另一路流过 R_2 ，由于开始 R_2 温度低，阻值大，经 R_2 分掉的电流小，灯泡流过的电流大而很亮，因为 R_2 与灯泡距离近，受灯泡的烘烤而温度上升，阻值变小，分掉的电流增大，流过灯泡的电流减小，灯泡变暗，回到正常亮度。

(2) PTC 的应用 在图 1-19b 中，当合上开关 S 时，有电流流过 R_1 (开关型 PTC) 和灯泡，由于开始 R_1 温度低，阻值小 (相当于开关闭合)，流过电流大，灯泡很亮，随着电流流过 R_1 ， R_1 温度升高，当 R_1 温度达到居里点温度时， R_1 的阻值急剧增大 (相当于开关断开)，流过的电流很小，灯泡无法被继续点亮而熄灭，在此之后，流过的小电流维持 R_1 为高阻值，灯泡一直处于熄灭状态。如果要灯泡重新亮，可先断开 S，然后等待几分钟，让 R_1 冷却下来，然后闭合 S，灯泡会亮一下又熄灭。

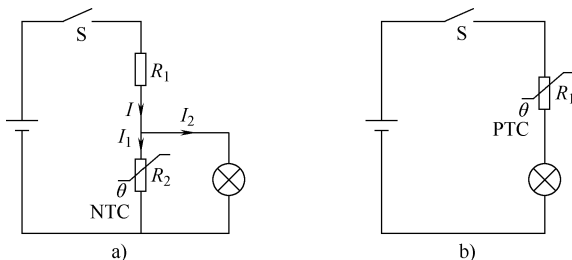


图 1-19 热敏电阻器的应用说明图

1.3.2 光敏电阻器

光敏电阻器是一种对光线敏感的电阻器，当照射的光线强弱变化时，阻值也会随之变化，通常光线越强阻值越小。根据光的敏感性不

同，光敏电阻器可分为可见光光敏电阻器（硫化镉材料）、红外光光敏电阻器（砷化镓材料）和紫外光光敏电阻器（硫化锌材料）。其中硫化镉材料制成的可见光光敏电阻器应用最广泛。

1. 外形与符号

光敏电阻器外形与图形符号如图 1-20 所示。

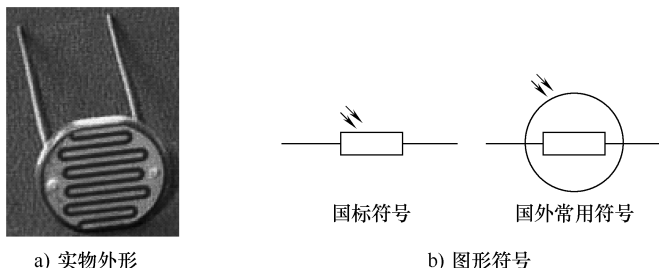


图 1-20 光敏电阻器

2. 应用

光敏电阻器的功能与固定电阻器一样，不同在于它的阻值可以随光线强弱变化而变化。

(1) 应用一 在图 1-21a 中，若光敏电阻器 R_2 无光线照射， R_2 的阻值会很大，流过灯泡的电流很小，灯泡很暗。若用光线照射 R_2 ， R_2 阻值变小，流过灯泡的电流增大，灯泡变亮。

(2) 应用二 在图 1-21b 中，若光敏电阻器 R_2 无光线照射， R_2 的阻值会很大，经 R_2 分掉的电流少，流过灯泡的电流大，灯泡很亮。若用光线照射 R_2 ， R_2 阻值变小，经 R_2 分掉的电流多，流过灯泡的电流减少，灯泡变暗。

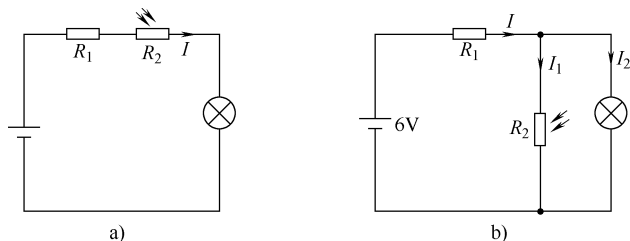


图 1-21 光敏电阻器的应用说明图

3. 主要参数

光敏电阻器的参数很多，主要参数有暗电流和暗阻、亮电流和亮阻、额定功率、最大工作电压及光谱响应等。

(1) 暗电流和暗阻 在两端加有电压的情况下，无光照射时流过光敏电阻器的电流称为暗电流；在无光照射时光敏电阻器的阻值称为暗阻，暗阻通常在几百 $k\Omega$ 以上。

(2) 亮电流和亮阻 在两端加有电压的情况下，有光照射时流过光敏电阻器的电流称为亮电流；在有光照射时光敏电阻器的阻值称为亮阻，亮阻一般在几十 $k\Omega$ 以下。

(3) 额定功率 额定功率是指光敏电阻器长期使用时允许的最大功率。光敏电阻器的额定功率有 $5 \sim 300mW$ 多种规格供选择。

(4) 最大工作电压 最大工作电压是指光敏电阻器工作时两端允许的最高电压，一般为几十伏至上百伏。

(5) 光谱响应 光谱响应又称光谱灵敏度，它是指光敏电阻器在不同颜色光线照射下的灵敏度。

光敏电阻器除了有上述参数外，还有光照特性（阻值随光照强度变化的特性）、温度系数（阻值随温度变化的特性）和伏安特性（两端电压与流过电流的关系）等。

1.3.3 压敏电阻器

压敏电阻器是一种对电压敏感的特殊电阻器，当两端电压低于标称电压时，其阻值接近无穷大，当两端电压超过标称电压值时，阻值急剧变小，如果两端电压回落至标称电压值以下时，其阻值又恢复到接近无穷大。压敏电阻器种类较多，以氧化锌（ ZnO ）为材料制作而成的压敏电阻器应用最为广泛。

1. 外形与符号

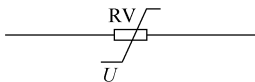
压敏电阻器外形与图形符号如图 1-22 所示。

2. 应用

压敏电阻器具有过电压时阻值变小的性质，利用该性质可以将压敏电阻器应用在保护电路中。图 1-23 是一个家用电器保护器，在使用时将它接在 220V 市电和家用电器之间。



a) 实物外形



b) 图形符号

图 1-22 压敏电阻器

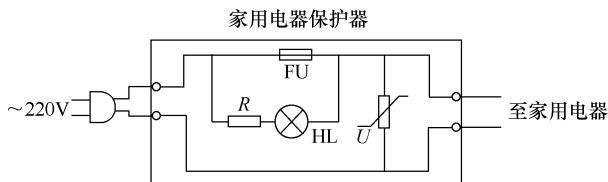


图 1-23 压敏电阻器构成的家用电器保护器

在正常工作时，220V 市电通过保护器中的熔断器 FU 和导线送给家用电器。当某些因素（如雷电窜入电网）造成市电电压上升时，上升的电压通过插头、导线和熔断器加到压敏电阻器两端，压敏电阻器马上击穿而阻值变小，流过熔断器和压敏电阻器的电流急剧增大，熔断器瞬间熔断，高电压无法到达家用电器，从而保护了家用电器不被高压损坏。在熔断器熔断后，有较小的电流流过高阻值的电阻 R 和灯泡，灯泡亮，指示熔断器损坏。由于压敏电阻器具有自我恢复功能，在电压下降后阻值又变为无穷大，当更换熔断器后，保护器可重新使用。

3. 主要参数

压敏电阻器参数很多，主要参数有标称电压、漏电流和通流量。

(1) 标称电压 标称电压又称压敏电压、击穿电压或阈值电压，它是指压敏电阻器通过 1mA 直流电流时两端的电压值。当加到压敏电阻器两端电压超过标称电压时，阻值会急剧减小。压敏电阻器的标称电压可在 10 ~ 9000V 范围选择。有些压敏电阻器会标出标称电压值，如图 1-24 中的压敏电阻器标注“201K”，其中“201”表示标称电压为 $20 \times 10^1 = 200V$ ，“K”表示偏差为 $\pm 10\%$ ，若标注为“200”则表示标称电压为 $20 \times 10^0 = 20V$ 。



图 1-24 压敏电阻器标称电压识读例图

在选用压敏电阻器标称电压时，可用 $U_{1mA} = 2.2 U_{AC}$ 来计算， U_{1mA} 表示标称电压， U_{AC} 表示加到压敏电阻器两端的交流电压有效值，例如要将一个压敏电阻器接 220V 的交流电压时，应选标称电压在 $U_{1mA} = 2.2 U_{AC} = 2.2 \times 220V = 484V$ 左右的压敏电阻器。

(2) 漏电流 漏电流又称等待电流，是指在压敏电阻器两端加有 75% 标称电压时通过的直流电流。压敏电阻器的漏电流通常小于 $50\mu A$ 。

(3) 通流量 通流量又称通流容量，是指压敏电阻器在短时间内（几微秒～几毫秒）允许流过的最大电流。

1.3.4 湿敏电阻器

湿敏电阻器是一种对湿度敏感的电感器，当湿度变化时其阻值也会随之变化。湿敏电阻器可为正湿度特性湿敏电阻器（阻值随湿度增大而增大）和负湿度特性湿敏电阻器（阻值随湿度增大而减小）。

1. 外形与符号

湿敏电阻器实物外形与图形符号如图 1-25 所示。

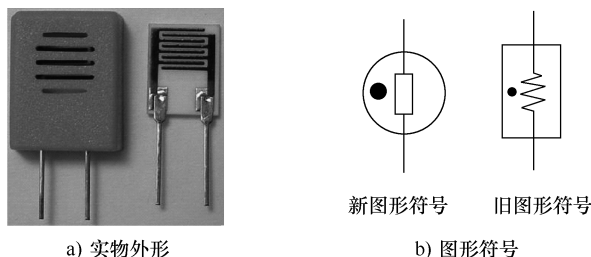


图 1-25 湿敏电阻器

2. 应用

湿敏电阻器具有湿度变化时阻值也会变化的特点，利用该特点可以用湿敏电阻器作为传感器来检测环境湿度大小。图 1-26 就是一个用湿敏电阻器制作的简易湿度指示表。

图 1-26 中的 R_2 是一个正湿度系数湿敏电阻器，将它放置在需检测湿度的环境中（如放在厨房内），当闭合开关 S 后，流过 R_1 的电流分成两路：一路经 R_2 流到电源负极，另一路流过电流表回到电源负极。若厨房的湿度较低， R_2 的阻值小，分流掉的电流大，流过电流表的电流

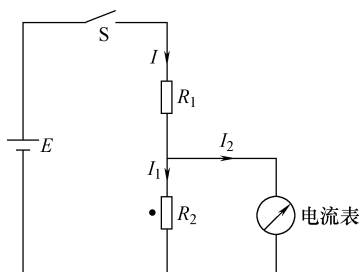


图 1-26 用湿敏电阻器制作的
简易湿度指示表

较小，指示的电流值小，表示厨房内的湿度低；若厨房的湿度很大， R_2 的阻值变大，分流掉的电流小，流过电流表的电流增大，指示的电流值大，表示厨房内的湿度大。

1.3.5 气敏电阻器

气敏电阻器是一种对某种或某些气体敏感的电阻器，当空气中某种或某些气体含量发生变化时，置于其中的气敏电阻器阻值就会发生变化。

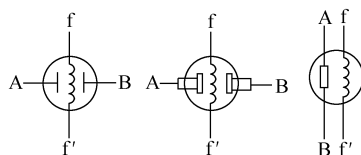
气敏电阻器种类很多，其中采用半导体材料制成的气敏电阻器应用最广泛。半导体气敏电阻器有 N 型和 P 型之分，N 型气敏电阻器在检测到甲烷、一氧化碳、天然气、煤气、液化石油气、乙炔、氢气等气体时，其阻值会减小；P 型气敏电阻器在检测到可燃气体时，其电阻值将增大，而在检测到氧气、氯气及二氧化氮等气体时，其阻值会减小。

1. 外形与符号

气敏电阻器的实物外形与图形符号如图 1-27 所示。



a) 实物外形



f-f': 灯丝 (加热极)
A-B: 检测极

b) 图形符号

图 1-27 气敏电阻器

2. 结构

气敏电阻器的典型结构及特性曲线如图 1-28 所示。

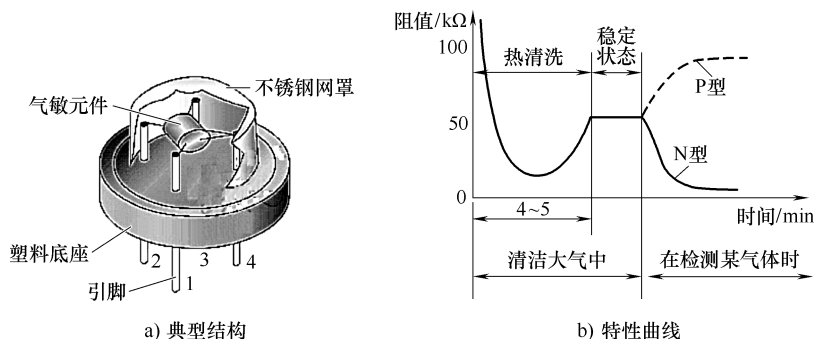


图 1-28 气敏电阻器的典型结构及特性曲线

气敏电阻器的气敏特性主要由内部的气敏元件来决定。气敏元件引出 4 个电极，分别与 1、2、3、4 脚相连。当在清洁的大气中给气敏电阻器的 1、2 脚通电流（对气敏元件加热）时，3、4 脚之间的阻值先减小再升高（4~5min），阻值变化规律如图 1-28b 曲线所示，升高到一定值时阻值保持稳定，若此时气敏电阻器接触某种气体时，气敏元件吸附该气体后，3、4 脚之间阻值又会发生变化（若是 P 型气敏电阻器，其阻值会增大，而 N 型气敏电阻器阻值会变小）。

3. 应用

气敏电阻器具有对某种或某些气体敏感的特点，利用该特点可以用气敏电阻器来检测空气中特殊气体的含量。图 1-29 中采用气敏电阻器制作的简易煤气报警器，可将它安装在厨房来监视有无煤气泄漏。

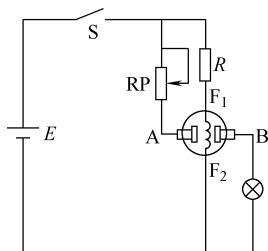


图 1-29 采用气敏电阻器制作的简易煤气报警器

在制作报警器时，先按图 1-29 所示将气敏电阻器连接好，然后闭合开关 S，让电流通过 R 流入气敏电阻器加热线圈，几分钟过后，待气敏电阻器 AB 间的阻值稳定后，再调节电位器 RP，让灯泡处于将亮未亮状态。若发生煤气泄漏，气敏电阻器检测到后，AB 间的阻值变小，流过灯泡的电流增大，灯泡亮起来，警示煤气发生泄漏。

1.3.6 力敏电阻器

力敏电阻器是一种对压力敏感的电感器，当施加给它的压力发生变化时，其阻值也会随之变化。

1. 外形与符号

力敏电阻器实物外形与图形符号如图 1-30 所示。



图 1-30 力敏电阻器

2. 结构原理

力敏电阻器的压敏特性是由内部封装的电阻应变片来实现的。电阻应变片有金属电阻应变片和半导体应变片两种，这里简单介绍金属电阻应变片。金属电阻应变片的结构如图 1-31 所示。

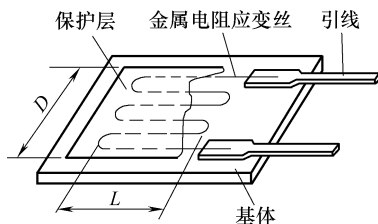


图 1-31 金属电阻应变片的结构

从图中可以看出,金属电阻应变片主要由金属电阻应变丝构成,当对金属电阻应变丝施加压力时,应变丝的长度和截面积(粗细)就会发生变化,施加的压力越大,应变丝越细越长,其阻值就越大。在使用应变片时,一般将电阻应变片粘贴在某物体上,当对该物体施加压力时,物体会变形,粘贴在物体上的电阻应变片也一起产生形变,应变片的阻值就会发生改变。

3. 应用

力敏电阻器具有阻值随施加的压力变化而变化的特点,利用该特点可以用力敏电阻器作传感器来检压力的大小。图 1-32 就是一个用力敏电阻器制作的简易压力指示器。

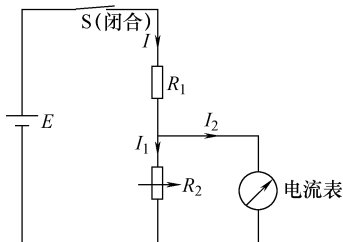


图 1-32 用力敏电阻器制作的
简易压力指示器

在制作压力指示器前,先将力敏电阻器 R_2 (电阻应变片) 紧紧粘贴在钢板上,然后按图 1-32 将力敏电阻器引脚与电路连接好,再对钢板施加压力让钢板变形,由于力敏电阻器与钢板紧贴在一起,所以力敏电阻器也随之变形。对钢板施加压力越大,钢板变形越严重,力敏电阻器 R_2 变形也越严重, R_2 阻值增大,对电流分流少,流过电流表的电流增大,指示电流值越大,表明施加给钢板的压力越大。

1.3.7 敏感电阻器的型号命名方法

敏感电阻器的型号命名及含义说明见表 1-7。

表 1-7 敏感电阻器的型号命名及含义

第一部分 主称		第二部分 类别		第三部分:用途或特征												第四部 分序号		
				热敏 电阻器		压敏 电阻器		光敏 电阻器		湿敏 电阻器		气敏 电阻器		磁敏元件			力敏元件	
字母	含义	字母	含义	数字	用途 或特征	字母	用途 或特征	数字	用途 或特征	字母	用途 或特征	字母	用途或 特征	字母	用途 或特征	数字	用途 或特征	用数字或 数字、字母 混合表示
M	敏感 元件	Z	正温度 系数 热敏 电阻器	1	普通用	W	稳压用	1	紫外光	C	测湿用	Y	烟敏	Z	电阻器	1	硅应 变片	
		F	负温度 系数 热敏 电阻器	2	稳压用	G	高压 保护用	2	紫外光			J	酒精			2	硅应 变梁	
		Y	压敏 电阻器	3	微波 测量用	P	高频用	3	紫外光			K	可燃性			3	硅林	
		S	湿敏 电阻器	4	旁热式	N	高能用	4	可见光							4		
		Q	气敏 电阻器	5	测温用	K	高可靠用	5	可见光			N	N 型			5		

电子元器件选用轻松入门

(续)

第一部分 主称		第二部分 类别		第三部分:用途或特征														第四部分 分序号
				热敏 电阻器		压敏 电阻器		光敏 电阻器		湿敏 电阻器		气敏 电阻器		磁敏元件		力敏元件		
字母	含义	字母	含义	数字	用途 或特征	字母	用途 或特征	数字	用途 或特征	字母	用途 或特征	字母	用途或 特征	字母	用途 或特征	数字	用途 或特征	用数字或 数字、字母 混合表示
M	敏感 元件	G	光敏 电阻器	6	控温用	L	防雷用	6	可见光	K	控湿用	P	P 型	W	电位器	6		
		C	磁敏 电阻器	7	消磁用	H	灭弧用	7	红外光							7		
		L	力敏 电阻器	8	线性用	Z	消噪用	8	红外光							8		
				9	恒温用	B	补偿用	9	红外光							9		
				0	特殊用	C	消磁用	0	特殊							0		

举例：

RRC5 (温度测量与控制 用热敏电阻器)	MG45-14 (可见光敏电阻器)	MS01-A (通用型号 湿敏电阻器)	MY31-270/3 (270V/3kA 普通 压敏电阻器)
R—电阻器	M—敏感电阻器	M—敏感电阻器	M—敏感电阻器
R—热敏	G—光敏电阻器	S—湿敏电阻器	Y—压敏电阻器
C—温度测量与控制	4—可见光	01-A—序号	31—序号
5—序号	5-14—序号		270—标称电压为 270V
			3—通流容量为 3kA

1.4 排阻

排阻又称电阻排，它是由多个电阻器按一定的方式制作并封装在一起而构成的。排阻具有安装密度高和安装方便等优点，广泛用在数字电路系统中。

1.4.1 实物外形

常见的排阻实物外形如图 1-33 所示，前面两种为直插封装式（SIP）排阻，后一种为表面贴装式（SMD）排阻。

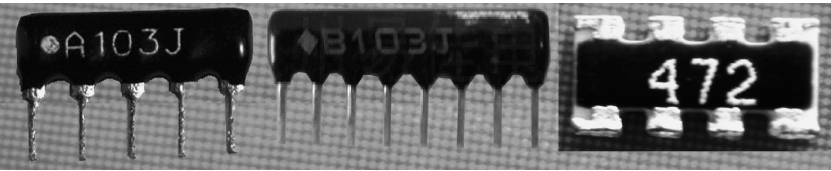


图 1-33 常见的排阻实物外形

1.4.2 命名方法

排阻命名一般由 4 部分组成，第一部分为内部电路类型，第二部分为引脚数（由于引脚数可直接看出，故该部分可省略），第三部分为阻值，第四部分为阻值偏差。排阻命名方法见表 1-8。

表 1-8 排阻命名方法

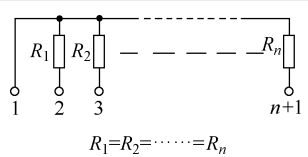
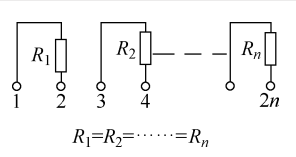
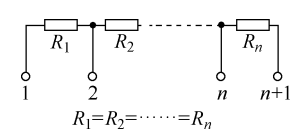
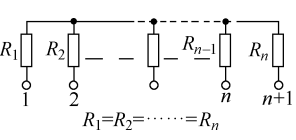
第一部分 内部电路类型	第二部分 引脚数	第三部分 阻值	第四部分 偏差
A: 所有电阻共用一端，公共端从左端（第1引脚）引出 B: 每个电阻有各自独立引脚，相互间无连接 C: 各个电阻首尾相连，各连接端均有引出脚 D: 所有电阻共用一端，公共端从中间引出 E、F、G、H、I: 内部连接较为复杂，详见表 1-9	4 ~ 14	3 位数字 (第1、2 位为有效数，第3 位为有效数后面0 的个数，如 102 表示 1000Ω)	F: ±1% G: ±2% J: ±5%

举例：排阻 A08472J 为 8 个引脚 4700（1±5%）Ω 的 A 类排阻。

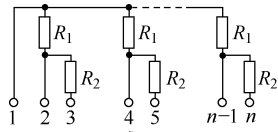
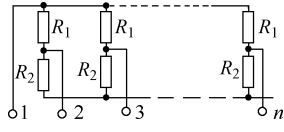
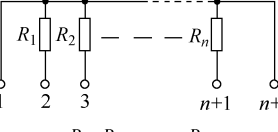
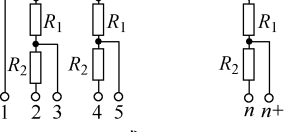
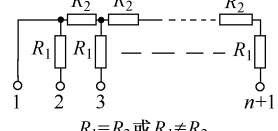
1.4.3 类型及内部电路结构

根据内部电路结构不同，排阻类型可分为 A、B、C、D、E、F、G、H、I。排阻虽然种类很多，但最常用的为 A、B 类。排阻的类型及内部电路结构见表 1-9。

表 1-9 排阻的类型及内部电路结构

类型 代码	电 路 结 构	类型 代码	电 路 结 构
A	 $R_1=R_2=\cdots=R_n$	B	 $R_1=R_2=\cdots=R_n$
C	 $R_1=R_2=\cdots=R_n$	D	 $R_1=R_2=\cdots=R_n$

(续)

类型 代码	电 路 结 构	类型 代码	电 路 结 构
E	 $R_1=R_2$或$R_1\neq R_2$	F	 $R_1=R_2$或$R_1\neq R_2$
G	 $R_1=R_2=\dots=R_n$	H	 $R_1=R_2$或$R_1\neq R_2$
I	 $R_1=R_2$或$R_1\neq R_2$		

第 2 章

电 容 器

2.1 固定电容器

电容器是一种可以存储电荷的元件。相距很近且中间隔有绝缘介质（如空气、纸和陶瓷等）的两块导电极板就构成了电容器。

2.1.1 结构、外形与符号

电容器的结构、外形与电路符号如图 2-1 所示。



图 2-1 电容器

2.1.2 主要参数

电容器主要参数有标称容量、允许偏差、额定电压和绝缘电阻等。

1. 容量与允许偏差

电容器能存储电荷，其存储电荷的多少称为容量。这一点与蓄电池类似，不过蓄电池存储电荷的能力比电容器大得多。电容器的容量越大，存储的电荷越多。电容器的容量大小与下面的因素有关：

- 1) 两导电极板相对面积。相对面积越大，容量越大。
- 2) 两极板之间的距离。极板相距越近，容量越大。
- 3) 两极板中间的绝缘介质。在极板相对面积和距离相同的情况下，

绝缘介质不同的电容器，其容量不同。

电容器的容量单位有法拉（简称为法，F）、毫法（mF）、微法（μF）、纳法（nF）和皮法（pF），它们之间的换算关系是

$$1\text{F} = 10^3\text{mF} = 10^6\mu\text{F} = 10^9\text{nF} = 10^{12}\text{pF}$$

标注在电容器上的容量称为标称容量。允许偏差是指电容器标称容量与实际容量之间允许的最大偏差范围。

2. 额定电压

额定电压又称电容器的耐压值，它是指在正常条件下电容器长时间使用两端允许承受的最高电压。一旦加到电容器两端的电压超过额定电压，两极板之间的绝缘介质容易被击穿而失去绝缘能力，造成两极板短路。

3. 绝缘电阻

电容器两极板之间隔着绝缘介质，绝缘电阻用来表示绝缘介质的绝缘程度。绝缘电阻越大，表明绝缘介质绝缘性能越好，如果绝缘电阻比较小，绝缘介质绝缘性能下降，就会出现一个极板上的电流会通过绝缘介质流到另一个极板上，这种现象称为漏电。由于绝缘电阻小的电容器存在着漏电，故不能继续使用。

一般情况下，无极性电容器的绝缘电阻为无穷大，而有极性电容器（电解电容器）绝缘电阻很大，但一般达不到无穷大。

2.1.3 性质

电容器的性质主要有“充电”、“放电”和“隔直”、“通交”。

1. 电容器的“充电”和“放电”性质

“充电”和“放电”是电容器非常重要的性质，下面以图 2-2 所示的电路来说明该性质。

（1）充电 在图 2-2a 所示电路中，当开关 S_1 闭合后，从电源正极输出电流经开关 S_1 流到电容器的金属极板 E 上，在极板 E 上聚集了大量的正电荷，由于金属极板 F 与极板 E 相距很近，又因为同性相斥，所以极板 F 上的正电荷受到很近的极板 E 上正电荷的排斥而流走，这些正电荷汇合形成电流到达电源的负极，极板 F 上就剩下很多负电荷，结果在电容器的上、下极板就存储了大量的上正下负的电荷。注意，在常态时，金属极板 E、F 不呈电性，但上、下极板上都有大量的正负电荷，

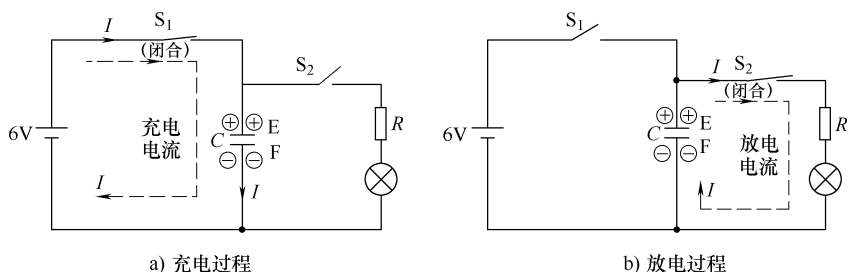


图 2-2 电容充、放电性质说明图

只是正负电荷数相等呈中性。

电源输出电流流经电容器，在电容器上获得大量电荷的过程称为电容器的“充电”。

(2) 放电 在图 2-2b 所示电路中，先闭合开关 S_1 ，让电源对电容器 C 充得上正下负的电荷，然后断开 S_1 ，再闭合开关 S_2 ，电容器上的电荷开始释放，电荷流经的途径是，电容器极板 E 上的正电荷流出，形成电流 $\rightarrow$ 开关 $S_2 \rightarrow$ 电阻 $R \rightarrow$ 灯泡 $\rightarrow$ 极板 F，中和极板 F 上的负电荷。大量的电荷移动形成电流，该电流经灯泡，灯泡发光。随着极板 E 上的正电荷不断流走，正电荷的数量慢慢减少，流经灯泡的电流减少，灯泡慢慢变暗，当极板 E 上先前充得的正电荷全放完后，无电流流过灯泡，灯泡熄灭，此时极板 F 上的负电荷也完全被中和，电容器两极板上先前充得的电荷消失。

电容器一个极板上的正电荷经一定的途径流到另一个极板，中和该极板上负电荷的过程称为电容器的“放电”。

电容器充电后两极板上存储了电荷，两极板之间也就有了电压，这就像杯子装水后有水位一样。电容器极板上的电荷数与两极板之间的电压有一定的关系，具体可这样概括：在容量不变情况下，电容器存储的电荷数与两端电压成正比，即

$$Q = C \cdot U$$

式中， Q 表示电荷数 (C)； C 表示容量 (F)； U 表示电容器两端的电压 (V)。

这个公式可以从以下几个方面来理解：

1) 在容量不变的情况下 (C 不变)，电容器充的电荷越多 (Q 增大)，两端电压越高 (U 增大)。这就像杯子大小不变时，杯子中装的水

越多，杯子的水位越高一样。

2) 若向容量一大一小的两只电容器充相同数量的电荷 (Q 不变), 那么容量小的电容器两端的电压更高 (C 小 U 大)。这就像往容量一大一小的两只杯子装入同样多的水时, 小杯子中的水位更高一样。

2. 电容器的“隔直”和“通交”性质

电容器的“隔直”和“通交”是指直流不能通过电容器, 而交流能通过电容器。下面以图 2-3 所示的电路来说明电容器的“隔直通交”性质。

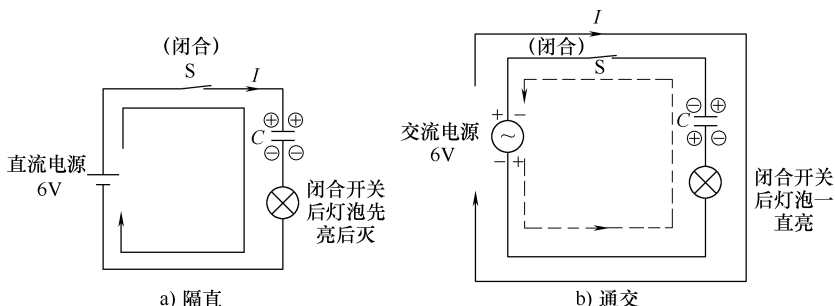


图 2-3 电容器的“隔直通交”性质说明图

(1) 隔直 在图 2-3a 电路中, 电容器与直流电源连接, 当开关 S 闭合后, 直流电源开始对电容器充电, 充电途径是电源正极→开关 S→电容器的上极板获得大量正电荷→通过电荷的排斥作用 (电场作用), 下极板上的大量正电荷被排斥流出形成电流→灯泡→电源的负极, 有电流流过灯泡, 灯泡亮。随着电源对电容器不断充电, 电容器两端电荷越来越多, 两端电压越来越高, 当电容器两端电压与电源电压相等时, 电源不能再对电容器充电, 无电流流到电容器上极板, 下极板也就无电流流出, 无电流流过灯泡, 灯泡熄灭。

以上过程说明, 在刚开始时直流可以对电容器充电而通过电容器, 该过程持续时间很短, 充电结束后, 直流就无法通过电容器, 这就是电容器的“隔直”性质。

(2) 通交 在图 2-3b 所示电路中, 电容器与交流电源连接, 由于交流电的极性是经常变化的, 故图 2-3b 中的交流电源的极性也是经常变化的, 一段时间极性是上正下负, 下一段时间极性变为下正上负。开

关 S 闭合后, 当交流电源的极性是上正下负时, 交流电源从上端输出电流, 该电流对电容器充电, 充电途径是: 交流电源上端→开关 S→电容器→灯泡→交流电源下端, 有电流流过灯泡, 灯泡发光, 同时交流电源对电容器充得上正下负的电荷; 当交流电源的极性变为上负下正时, 交流电源从下端输出电流, 它经过灯泡对电容反充电, 电流途径是交流电源下端→灯泡→电容器→开关 S→交流电源上端, 有电流流过灯泡, 灯泡发光, 同时电流对电容器反充得上负下正的电荷, 这次充得的电荷极性与先前充得电荷极性相反, 它们相互中和抵消, 电容器上的电荷消失。当交流电源极性重新变为上正下负时, 又可以对电容器进行充电, 以后不断重复上述过程。

从上面的分析可以看出, 由于交流电源的极性不断变化, 使得电容器充电和反充电 (中和抵消) 交替进行, 从而始终有电流流过电容器, 这就是电容器“通交”性质。

(3) 电容器对交流有阻碍作用

电容器虽然能通过交流, 但对交流也有一定的阻碍, 这种阻碍称为容抗, 用 X_C 表示, 容抗的单位是欧姆 (Ω)。在图 2-4 所示电路中, 两个电路中的交流电源电压相等, 灯泡也一样, 但由于电容器的容抗对交流阻碍作用, 故图 2-4b 中的灯泡要暗一些。

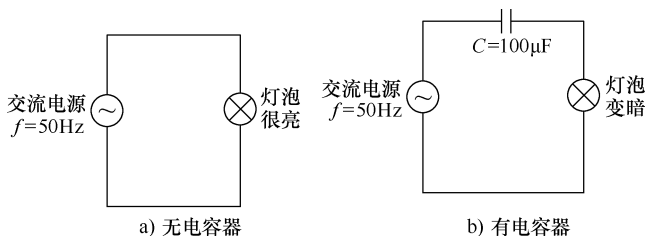


图 2-4 容抗说明图

电容器的容抗与交流信号频率、电容器的容量有关, 交流信号频率越高, 电容器对交流信号的容抗越小, 电容器容量越大, 它对交流信号的容抗越小。在图 2-4b 所示电路中, 若交流电频率不变, 当电容器容量越大, 灯泡越亮; 或者电容器容量不变, 交流电频率越高灯泡越亮。这种关系可用下列公式表示:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

式中, X_c 表示容抗; f 表示交流信号频率; π 为常数 3.14。

在图 2-4b 所示电路中, 若交流电源的频率 $f=50\text{Hz}$, 电容器的容量 $C=100\mu\text{F}$, 那么该电容器对交流电的容抗为

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 100 \times 10^{-6}} \Omega \approx 31.8\Omega$$

2.1.4 极性

固定电容器可分为无极性电容器和有极性电容器。

1. 无极性电容器

无极性电容器的引脚无正、负极之分。无极性电容器的电路符号如图 2-5a 所示, 常见无极性电容器外形如图 2-5b 所示。无极性电容器的容量小, 但耐压高。

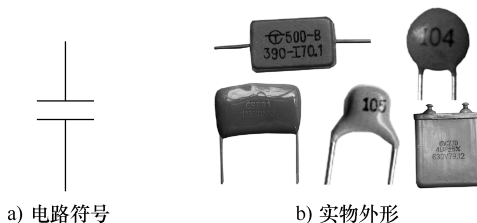


图 2-5 无极性电容器

2. 有极性电容器

有极性电容器又称电解电容器, 引脚有正、负之分。有极性电容器的电路符号如图 2-6a 所示, 常见有极性电容器外形如图 2-6b 所示。有极性电容器的容量大, 但耐压较低。

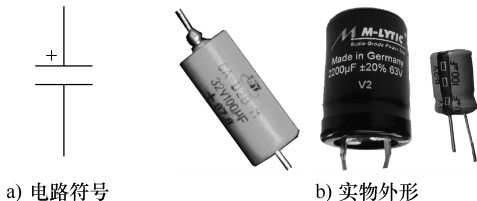


图 2-6 有极性电容器

有极性电容器引脚有正负之分，在电路中不能乱接，若正负位置接错，轻则电容器不能正常工作，重则电容器炸裂。**有极性电容器正确的连接方法是，电容器正极接电路中的高电位，负极接电路中的低电位。**有极性电容器正确和错误的接法分别如图 2-7 所示。

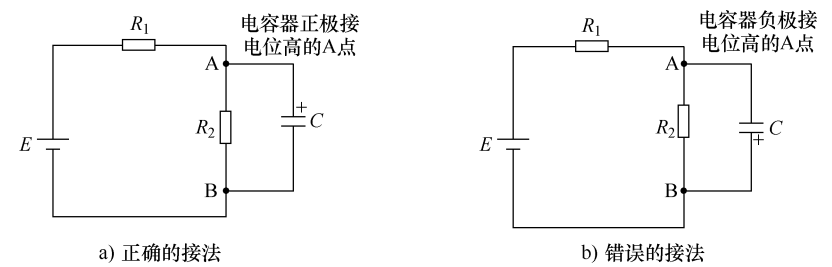


图 2-7 有极性电容器的正确与错误连接方法

2.1.5 种类

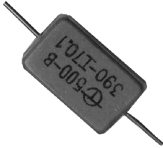
固定电容器种类很多，按应用材料可分为纸介电容（CZ）、高频瓷介电容（CC）、低频瓷介电容（CT）、云母电容（CY）、聚苯乙烯等薄膜电容（CB）、玻璃釉电容（CI）、漆膜电容（CQ）、玻璃膜电容（CO）、涤纶等薄膜电容（CL）、云母纸电容（CV）、金属化纸电容（CJ）、复合介质电容（CH）、铝电解电容（CD）、钽电解电容（CA）、铌电解电容（CN）、合金电解电容（CG）和其他材料电解电容（CE）等。

不同材料的电容器有不同的结构与特点，表 2-1 对一些常见电容器的特点进行说明。

表 2-1 各种电容器特点

电 容 器	特 点
纸介电容器	纸介电容器是以两片金属箔做电极，中间夹有极薄的电容纸，再卷成圆柱形或者扁柱形芯，然后密封在金属壳或者绝缘材料壳（如陶瓷、火漆、玻璃釉等）中制成；它的特点是体积较小，容量可以做得较大，但固有电感和损耗都比较大，用于低频比较合适
	金属化纸介电容和油浸纸介电容是两种较特殊的纸介电容
	金属化纸介电容是在电容器纸上覆上一层金属膜来代替金属箔，其体积小、容量较大，一般用在低频电路中
	油浸纸介电容是把纸介电容浸在经过特别处理的油里，以增强它的耐压，其特点是耐压高、容量大，但体积也较大

(续)

电 容 器	特 点
云母电容器 	云母电容器是以金属箔或者在云母片上喷涂的银层作为极板，极板和云母片一层一层叠合后，再压铸在胶木粉或封固在环氧树脂中制成 云母电容器的特点是介质损耗小、绝缘电阻大、温度系数小，体积较大；云母电容器的容量一般为 $10\text{pF} \sim 0.1\mu\text{F}$，额定电压为 $100\text{V} \sim 7\text{kV}$，因其高稳定性和高可靠性特点，故常用于高频振荡等要求较高的电路中
陶瓷电容器 	陶瓷电容器是以陶瓷作介质，在陶瓷基体两面喷涂银层，然后烧成银质薄膜作为极板制成 陶瓷电容器的特点是体积小、耐热性好、损耗小、绝缘电阻高，但容量较小，一般用在高频电路中；高频瓷介电容器的容量通常为 $1 \sim 6800\text{pF}$，额定电压为 $63 \sim 500\text{V}$ 铁电陶瓷电容器是一种特殊的陶瓷电容器，其容量较大，但是损耗和温度系数较大，适宜用于低频电路；低频瓷介电容器的容量为 $10\text{pF} \sim 4.7\mu\text{F}$，额定电压为 $50 \sim 100\text{V}$
薄膜电容器 	薄膜电容器结构和纸介电容器相同，但介质是涤纶或者聚苯乙烯；涤纶薄膜电容器的介电常数较高，稳定性较好，适宜作旁路电容 薄膜电容器可分为聚酯（涤纶）电容器、聚苯乙烯薄膜电容器和聚丙烯电容器 聚酯（涤纶）电容器的容量为 $40\text{pF} \sim 4\mu\text{F}$，额定电压为 $63 \sim 630\text{V}$ 聚苯乙烯薄膜电容器的介质损耗小、绝缘电阻高，但温度系数较大，体积也较大，常用在高频电路中，聚苯乙烯电容器的容量为 $10\text{pF} \sim 1\mu\text{F}$，额定电压为 $100\text{V} \sim 30\text{kV}$ 聚丙烯电容器性能与聚苯乙烯薄膜电容器相似，但体积小，稳定性稍差，可代替大部分聚苯或云母电容器，常用于要求较高的电路，聚丙烯电容器的容量为 $1000\text{pF} \sim 10\mu\text{F}$，额定电压为 $63 \sim 2000\text{V}$
玻璃釉电容器 	玻璃釉电容器由一种浓度适于喷涂的特殊混合物喷涂成薄膜作为介质，再以银层电极经烧制而成 玻璃釉电容器能耐受各种气候环境，一般可在 200°C 或更高温度下工作，其特点是稳定性较好、损耗小；玻璃釉电容器的容量为 $10\text{pF} \sim 0.1\mu\text{F}$，额定电压为 $63 \sim 400\text{V}$

(续)

电 容 器	特 点
独石电容器 	独石电容器又称多层瓷介电容器, 可分 I、II 两种类型, I 型性能较好, 但容量一般小于 $0.2\mu\text{F}$, II 型容量大但性能一般; 独石电容器具有正温度系数, 而聚丙烯电容器具有负温度系数, 两者用适当比例并联使用, 可使温漂降到很小 独石电容器具有容量大、体积小、可靠性高、容量稳定、耐湿性好等特点, 广泛用于电子精密仪器和各种小型电子设备作谐振、耦合、滤波、旁路; 独石电容器容量范围为 $0.5\text{pF} \sim 1\mu\text{F}$, 耐压可为二倍额定电压
铝电解电容器 	铝电解电容器是由两片铝带和两层绝缘膜相互层叠, 卷好后浸泡在电解液 (含酸性的合成溶液) 中, 出厂前需要经过直流电压处理, 使正极片上形成一层氧化膜作介质 铝电解电容器的特点是体积小、容量大, 损耗大、漏电流较大和有正负极性, 常应用在电路中作电源滤波、低频耦合、去耦和旁路; 铝电解电容器的容量为 $0.47 \sim 10000\mu\text{F}$, 额定电压为 $6.3 \sim 450\text{V}$
钽、铌电解电容器 	钽、铌电解电容器是以金属钽或者铌做正极, 用稀硫酸等配液做负极, 再以钽或铌表面生成的氧化膜作介质制成 钽、铌电解电容器的特点是体积小、容量大、性能稳定、寿命长、绝缘电阻大、温度特性好, 并且损耗、漏电小于铝电解电容器, 常用在要求高的电路中代替铝电解电容器; 钽、铌电解电容器的容量为 $0.1 \sim 1000\mu\text{F}$, 额定电压为 $6.3 \sim 125\text{V}$

2.1.6 串联与并联

在使用电容器时, 如果无法找到合适容量或耐压的电容器, 可将多个电容器进行并联或串联来得到需要的电容器。

1. 电容器的并联

两个或两个以上电容器头头相连、尾尾相接称为电容器并联。电容器的并联如图 2-8 所示。

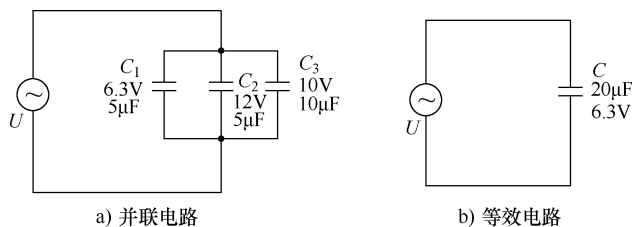


图 2-8 电容器的并联

电容器并联后的总容量增大，总容量等于所有并联电容器的容量之和，以图 2-8a 所示电路为例，并联后总容量为

$$C = C_1 + C_2 + C_3 = (5 + 5 + 10) \mu\text{F} = 20 \mu\text{F}$$

电容器并联后的总耐压以耐压最小的电容器的耐压为准，仍以图 2-8a 所示电路为例， C_1 、 C_2 、 C_3 耐压不同，其中 C_1 的耐压最小，故并联后电容器的总耐压以 C_1 耐压 6.3V 为准，加在并联电容器两端的电压不能超过 6.3V。

根据上述原则，图 2-8a 的电路可等效为图 2-8b 所示电路。

2. 电容器的串联

两个或两个以上电容器在电路中头尾相连就是电容器的串联。电容器的串联如图 2-9 所示。

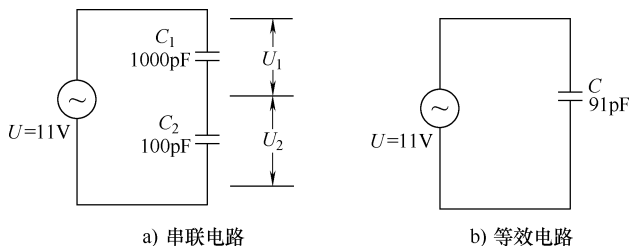


图 2-9 电容器的串联

电容器串联后总容量减小，总容量比容量最小电容器的容量还小。电容器串联后总容量的计算规律是总容量的倒数等于各电容器容量倒数之和，这与电阻器的并联计算相同，以如图 2-9a 所示电路为例，电容器串联后的总容量计算公式是

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{1000 \times 100}{1000 + 100} \text{pF} = 91 \text{pF}$$

所以图 2-9a 所示电路与图 2-9b 所示电路是等效的。

电容器串联后总耐压增大，总耐压较耐压最低电容器的耐压要高。在电路中，串联的各电容器两端承担的电压与容量成反比，即容量越大，在电路中承担电压越低，这个关系可用以下公式表示：

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

以图 2-9a 所示电路为例， C_1 的容量是 C_2 容量的 10 倍，用上述公式计算可知， C_2 两端承担的电压 U_2 应是 C_1 两端承担电压 U_1 的 10 倍，如果交流电压为 11V，则 $U_1 = 1\text{V}$ ， $U_2 = 10\text{V}$ ，若 C_1 、 C_2 都是耐压为 6.3V 的电容器，就会出现 C_2 首先被击穿短路（因为它两端承担了 10V 电压），11V 电压马上全部加到 C_1 两端，接着 C_1 被击穿损坏。

当电容器串联时，容量小的电容器应尽量选用耐压大的，以接近或等于电源电压为佳，因为当电容器串联在电路中时，容量小的电容器在电路中承担的电压较容量大的电容器承担电压大得多。

2.1.7 容量与误差的标注方法

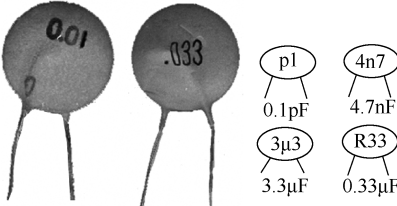
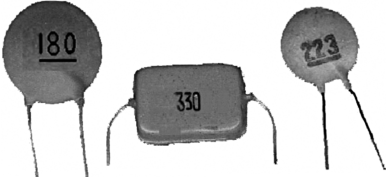
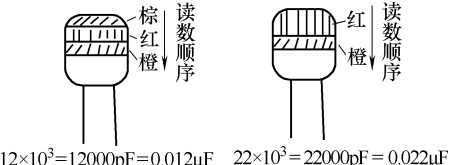
1. 容量的标注方法

电容器容量标注方法很多，表 2-2 列出了一些常用的容量标注方法。

表 2-2 电容器常用的容量标注方法

容量标注方法及说明	例 图
◆ 直标法：直标法是指在电容器上直接标出容量值和容量单位 电解电容器常采用直标法，右图左边的电容器的容量为 2200μF，耐压为 63V，偏差为 ±20%，右边电容器的容量为 68nF，J 表示偏差为 ±5%	

(续)

容量标注方法及说明	例 图
◆ 小数点标注法：容量较大的无极性电容器常采用小数点标注法，小数点标注法的容量单位是 μF 右图中的两个实物电容器的容量分别是 $0.01\mu\text{F}$ 和 $0.033\mu\text{F}$；有的电容器用 μ、n、p 来表示小数点，同时指明容量单位，如图中的 p1、4n7、3μ 分别表示容量 0.1pF、4.7nF、$3.3\mu\text{F}$，如果用 R 表示小数点，单位则为 μF，如 R33 表示容量是 $0.33\mu\text{F}$	
◆ 整数标注法：容量较小的无极性电容器常采用整数标注法，单位为 pF 若整数末位是 0，如标“330”则表示该电容器容量为 330pF；若整数末位不是 0，如标“103”，则表示容量为 $10 \times 10^3\text{pF}$；右图中的几个电容器的容量分别是 180pF、330pF 和 22000pF。如果整数末尾是 9，不是表示 10^9，而是表示 10^{-1}，如 339 表示 3.3pF	
◆ 色码标注法：色码表示法是指用不同颜色的色环、色带或色点表示容量大小的方法，色码标注法的单位为 pF 电容器的色码表示方法与色环电阻器相同，第 1、2 色码分别表示第 1、2 位有效数，第 3 色码表示倍乘数，第 4 色码表示误差数 在右图中，左边的电容器往引脚方向，色码依次为“棕红橙”，表示容量为 $12 \times 10^3 = 12000\text{pF} = 0.012\mu\text{F}$，右边电容器只有两条色码“红橙”，较宽的色码要当成两条相同的色码，该电容器的容量为 $22 \times 10^3 = 22000\text{pF} = 0.022\mu\text{F}$	 $12 \times 10^3 = 12000\text{pF} = 0.012\mu\text{F}$ $22 \times 10^3 = 22000\text{pF} = 0.022\mu\text{F}$

2. 误差表示法

电容器误差表示方法主要有罗马数字表示法、字母表示法和直接表示法。

(1) 罗马数字表示法 罗马数字表示法是在电容器标注罗马数字来表示偏差大小。这种方法用 0、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 分别表示偏差为 $\pm 2\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 和 $\pm 20\%$ 。

(2) 字母表示法 字母表示法是在电容器上标注字母来表示偏差的大小。字母及其代表的偏差数见表 2-3。例如某电容器上标注“K”，表示偏差为 $\pm 10\%$ 。

表 2-3 字母及其代表的偏差数

字 母	允 许 偏 差	字 母	允 许 偏 差
L	$\pm 0.01\%$	B	$\pm 0.1\%$
D	$\pm 0.5\%$	V	$\pm 0.25\%$
F	$\pm 1\%$	K	$\pm 10\%$
G	$\pm 2\%$	M	$\pm 20\%$
J	$\pm 5\%$	N	$\pm 30\%$
P	$\pm 0.02\%$	不标注	$\pm 20\%$
W	$\pm 0.05\%$		

(3) 直接表示法 直接表示法是指在电容器上直接标出偏差数值。如标注“ $68\text{pF} \pm 5\text{pF}$ ”表示偏差为 $\pm 5\text{pF}$ ，标注“ $\pm 20\%$ ”表示偏差为 $\pm 20\%$ ，标注“ $0.033/5$ ”表示偏差为 $\pm 5\%$ （%号被省掉）。

2.1.8 选用

电容器是一种较常用的电子元件，在选用时可遵循以下原则：

1) 标称容量要符合电路的需要。对于一些对容量大小有严格要求的电路（如定时电路、延时电路和振荡电路等），选用的电容器其容量应与要求相同，对于一些对容量要求不高的电路（如耦合电路、旁路电路、电源滤波和电源退耦等），选用的电容器其容量与要求相近即可。

2) 工作电压要符合电路的需要。为了保证电容器能在电路中长时间正常工作，选用的电容器其额定电压应略大于电路可能出现的最高电压，大于其 $10\% \sim 30\%$ 。

3) 电容器特性尽量符合电路需要。不同种类的电容器有不同的特

性，为了让电路工作状态尽量最佳，可针对不同电路的特点来选择适合种类的电容器。下面是一些电路选择电容器的规律：

- ① 对于电源滤波、退耦电路和低频耦合、旁路电路，一般选择电解电容器。
- ② 对于中频电路，一般可选择薄膜电容器和金属化纸介电容器。
- ③ 对于高频电路，应选用高频特性良好的电容器，如瓷介电容器和云母电容器。
- ④ 对于高压电路，应选用工作电压高的电容器，如高压瓷介电容器。
- ⑤ 对于频率稳定性要求高的电路（如振荡电路、选频电路和移相电路），应选用温度系数小的电容器。

2.1.9 电容器的型号命名方法

- 国产电容器型号命名由 4 部分组成。
 - 第一部分用字母“C”表示主称为电容器。
 - 第二部分用字母表示电容器的介质材料。
 - 第三部分用数字或字母表示电容器的特征。
 - 第四部分用数字表示序号。
- 电容器的型号命名及含义见表 2-4。

表 2-4 电容器的型号命名及含义

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分
主 称		介 质 材 料		特 征		序 号
符号	含义	符号	含义	符号	含义 (形状、结构、大小)	一般用数字表示产品的序号，以区分外形尺寸和性能指标
C	电容器	Z	纸介质	T	筒形	
		D	电解	G	管状	
		Y	云母	L	立式矩形	
		C	高频瓷介质	Y	圆片形	
		T	低频瓷介质	M	密封	
		J	金属化纸介质	X	小	
		B	聚苯乙烯等有机薄膜			
		L	涤纶等有机薄膜			

2.2 可变电容器

可变电容器又称可调电容器，是指容量可以调节的电容器。可变电容器可分为微调电容器、单联电容器和多联电容器等。

2.2.1 微调电容器

1. 外形与符号

微调电容器又称半可变电容器，其容量不经常调节。图 2-10a 所示是两种常见微调电容器实物外形，微调电容器用图 2-10b 所示符号表示。

2. 结构

微调电容器是由一片动片和一片定片构成。微调电容器的典型结构如图 2-11 所示，动片与转轴连接在一起，当转动转轴时，动片也随之转动，动、定片的相对面积就会发生变化，电容器的容量就会变化。

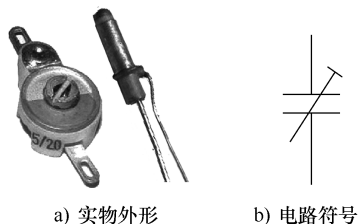


图 2-10 微调电容器

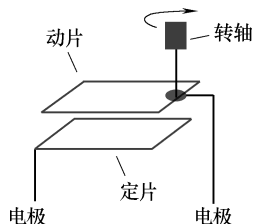


图 2-11 微调电容器的典型结构示意图

3. 种类

微调电容器可分为云母微调电容器、瓷介微调电容器、薄膜微调电容器和拉线微调电容器等。

云母微调电容器一般是通过螺钉调节动、定片之间的距离来改变容量。

瓷介微调电容器、薄膜微调电容器一般是通过改变动、定片之间的相对面积来改变容量。

拉线微调电容器是以瓷管内壁镀银层作为定片，外面缠绕的细金属丝为动片，减小金属丝的圈数，就可改变容量。这种电容器的容量只能

从大调到小。

2.2.2 单联电容器

1. 外形与符号

单联电容器是由多个连接在一起的金属片作为定片，以多个与金属转轴连接的金属片作动片构成。单联电容器的实物外形和电路符号如图 2-12 所示。

2. 结构

单联电容器的结构如图 2-13 所示，它是以多个有连接的金属片作定片，而将多个与金属转轴连接的金属片作动片，再将定片与动片的金属片交差且相互绝缘叠在一起，当转动转轴时，各个定片与动片之间的相对面积就会发生变化，整个电容器的容量就会变化。

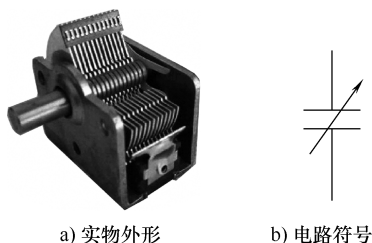


图 2-12 单联电容器

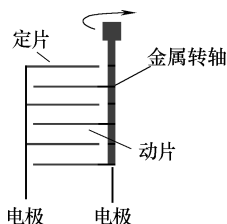


图 2-13 单联电容器的结构示意图

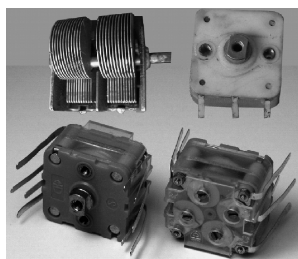
2.2.3 多联电容器

1. 外形与符号

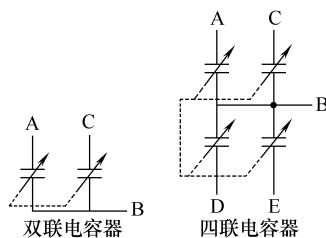
多联电容器是指将两个或两个以上的可变电容器结合在一起而构成的电容器。常见的多联电容器有双联电容器和四联电容器，多联电容器的实物外形和电路符号如图 2-14 所示。

2. 结构

多联电容器虽然种类较多，但结构大同小异，下面以图 2-15 所示的双联电容器为例说明，双联电容器有两组动片和两组定片构成，两组动片都与金属转轴相连，而各组定片都是独立的，当转动转轴时，与转轴连动的两组动片都会移动，它们与各自对应定片的相对面积会同时变化，两个电容器的容量被同时调节。



a) 实物外形



b) 电路符号

图 2-14 多联电容器

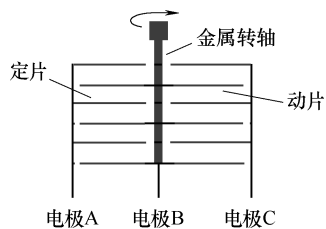


图 2-15 双联电容器的结构示意图

第 3 章

电感器与变压器

3.1 电感器

3.1.1 外形与符号

将导线在绝缘支架上绕制一定的匝数（圈数）就构成了电感器。常见的电感器的实物外形如图 3-1a 所示，根据绕制的支架不同，电感器可分为空心电感器（无支架）、磁心电感器（磁性材料支架）和铁心电感器（硅钢片支架），它们的电路符号如图 3-1b 所示。

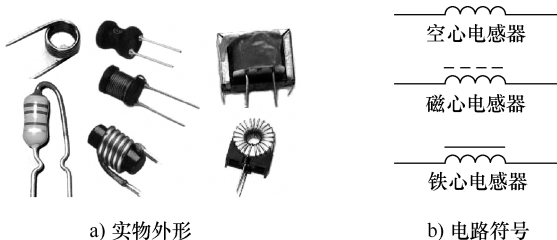


图 3-1 电感器

3.1.2 主要参数与标注方法

1. 主要参数

电感器的主要参数有电感量、偏差、品质因数和额定电流等。

(1) 电感量 电感器由线圈组成，当电感器通过电流时就会产生磁场，电流越大，产生的磁场越强，穿过电感器的磁场（又称为磁通量 Φ ）就越大。实验证明，通过电感器的磁通量 Φ 和通入的电流 I 成正比。磁通量 Φ 与电流的比值称为自感系数，又称电感量 L ，用公式表示为

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

电感量的基本单位为亨利（简称亨），用字母“H”表示。此外，还有毫亨（mH）和微亨（ μH ），它们之间的换算关系是

$$1\text{H} = 10^3\text{mH} = 10^6\mu\text{H}$$

电感器的电感量大小主要与线圈的匝数（圈数）、绕制方式和磁心材料等有关。线圈匝数越多、绕制的线圈越密集，电感量就越大；有磁心的电感器比无磁心的电感量大；电感器的磁心磁导率越高，电感量也就越大。

（2）偏差 偏差是指电感器上标称电感量与实际电感量的差距。对于精度要求高的电路，电感器的允许偏差范围通常为 $\pm 0.2\% \sim \pm 0.5\%$ ，一般的电路可采用偏差为 $\pm 10\% \sim \pm 15\%$ 的电感器。

（3）品质因数（ Q 值） 品质因数也称 Q 值，是衡量电感器质量的主要参数。品质因数是指当电感器两端加某一频率的交流电压时，其感抗 X_L （ $X_L = 2\pi fL$ ）与直流电阻 R 的比值。用公式表示为

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

从上式可以看出，感抗越大或直流电阻越小，品质因数就越大。电感器对交流信号的阻碍称为感抗，其单位为欧姆（ Ω ）。电感器的感抗大小与电感量有关，电感量越大，感抗越大。

提高品质因数既可通过提高电感器的电感量来实现，也可通过减小电感器线圈的直流电阻来实现。例如粗线圈绕制而成的电感器，直流电阻较小，其 Q 值高；有磁心的电感器较空心电感器的电感量大，其 Q 值也高。

（4）额定电流 额定电流是指电感器在正常工作时允许通过的最大电流值。电感器在使用时，流过的电流不能超过额定电流，否则电感器就会因发热而使性能参数发生改变，甚至会因过电流而烧坏。

2. 参数标注方法

电感器的参数标注方法主要有直标法和色标法。

（1）直标法 电感器采用直标法标注时，一般会在外壳上标注电感量、偏差和额定电流值。图 3-2 列出了几个采用直标法标注的电感器。

在标注电感量时，通常会将电感量值及单位直接标出。在标注偏差时，分别用 I、II、III 表示 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 。在标注额定电流

时，用 A、B、C、D、E 分别表示 50mA、150mA、300mA、0.7A 和 1.6A。

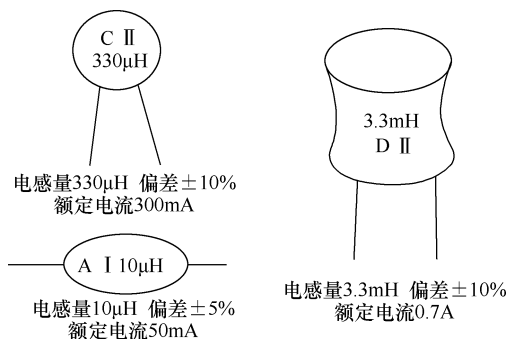


图 3-2 电感器的直标法例图

(2) 色标法 色标法是采用色点或色环标在电感器上来表示电感量和偏差的方法。色码电感器采用色标法标注，其电感量和偏差标注方法同色环电阻器，单位为 μH 。色码电感器的各种颜色含义及代表的数值与色环电阻器相同，具体可见表 1-2。色码电感器颜色的排列顺序方法也与色环电阻器相同。色码电感器与色环电阻器识读不同仅在于单位不同，色码电感器单位为 μH 。色码电感器的识别如图 3-3 所示，图中的色码电感器上标注“红棕黑银”表示电感量为 $21\mu\text{H}$ ，偏差为 $\pm 10\%$ 。

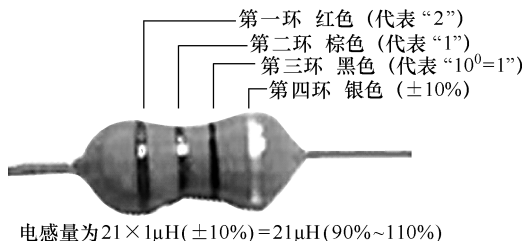


图 3-3 色码电感器参数的识别

3.1.3 性质

电感器的主要性质有“通直阻交”和“阻碍变化的电流”。

1. 电感器“通直阻交”性质

电感器的“通直阻交”是指电感器对通过的直流信号阻碍很小，直流信号可以很容易通过电感器，而交流信号通过时会受到较大的阻碍。

电感器对通过的交流信号有较大的阻碍，这种阻碍称为感抗，感抗用 X_L 表示，感抗的单位是欧姆 (Ω)。电感器的感抗大小与自身的电感量和交流信号的频率有关，感抗大小可以用以下公式计算：

$$X_L = 2\pi fL$$

式中， X_L 表示感抗 (Ω)； f 表示交流信号的频率 (Hz)； L 表示电感器的电感量 (H)。

由上式可以看出，交流信号的频率越高，电感器对交流信号的感抗越大；电感器的电感量越大，对交流信号感抗也越大。

举例：在图 3-4 所示的电路中，交流信号的频率为 50Hz，电感器的电感量为 200mH，那么电感器对交流信号的感抗为

$$X_L = 2\pi fL = (2 \times 3.14 \times 50 \times 200 \times 10^{-3}) \Omega = 62.8 \Omega$$

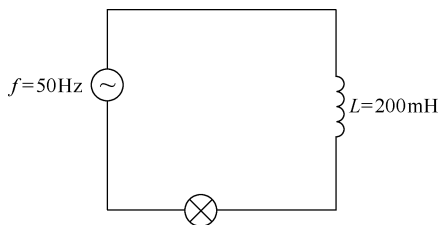


图 3-4 感抗计算例图

2. 电感器“阻碍变化的电流”性质

当变化的电流流过电感器时，电感器会产生自感电动势来阻碍变化的电流。下面以图 3-5 所示的两个电路来说明电感器这个性质。

在图 3-5a 中，当开关 S 闭合时，会发现灯泡不是马上亮起来，而是慢慢亮起来。这是因为当开关闭合后，有电流流过电感器，这是一个增大的电流（从无到有），电感器马上产生自感电动势来阻碍电流增大，其极性是 A 正 B 负，该电动势使 A 点电位上升，电流从 A 点流入较困难，也就是说电感器产生的这种电动势对电流有阻碍作用。由于电感器产生 A 正 B 负自感电动势的阻碍，流过电感器的电流不能一下子增大，而是慢慢增大，所以灯泡慢慢变亮，当电流不再增大（即电流大小恒

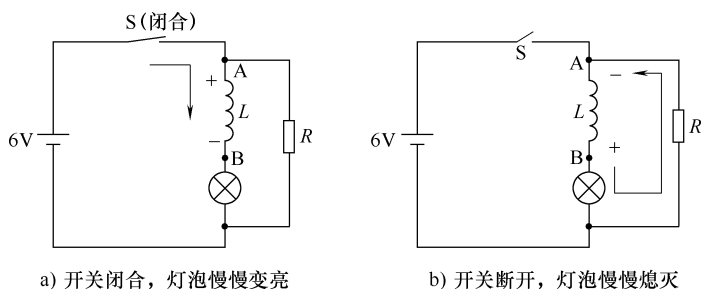


图 3-5 电感器“阻碍变化的电流”说明图

定) 时，电感器上的电动势消失，灯泡亮度也就不变了。

如果将开关 S 断开，如图 3-5b 所示，会发现灯泡不是马上熄灭，而是慢慢暗下来。这是因为当开关断开后，流过电感器的电流突然变为 0，也就是说流过电感器的电流突然变小（从有到无），电感器马上产生 A 负 B 正的自感电动势，由于电感器、灯泡和电阻器 R 连接成闭合回路，电感器的自感电动势会产生电流流过灯泡，电流方向是：电感器 B 正→灯泡→电阻器 R→电感器 A 负，开关断开后，该电流维持灯泡继续发光，随着电感器上的电动势逐渐降低，流过灯泡的电流慢慢减小，灯泡也就慢慢变暗。

从上面的电路分析可知，只要流过电感器的电流发生变化（不管是增大还是减小），电感器都会产生自感电动势，电动势的方向总是阻碍电流的变化。

电感器这个性质非常重要，在以后的电路分析中经常要用到该性质。为了让大家能更透彻理解电感器这个性质，再来看图 3-6 中两个例子。

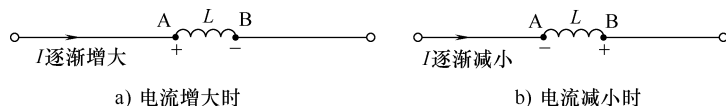


图 3-6 电感器性质解释图

在图 3-6a 中，流过电感器的电流是逐渐增大的，电感器会产生 A 正 B 负的电动势阻碍电流增大（可理解为 A 点为正，A 点电位升高，电流通过较困难）；在图 3-6b 中，流过电感器的电流是逐渐减小的，电感

器会产生 A 负 B 正的电动势阻碍电流减小（可理解为 A 点为负时，A 点电位低，吸引电流流过来，阻碍它减小）。

3.1.4 种类

电感器种类较多，下面主要介绍几种典型的电感器。

1. 可调电感器

可调电感器是指电感量可以调节的电感器。可调电感器的电路符号和实物外形如图 3-7 所示。

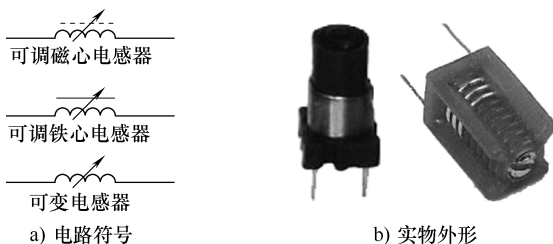


图 3-7 可调电感器

可调电感器是通过调节磁心在线圈中的位置来改变电感量，磁心进入线圈内部越多，电感器的电感量越大。如果电感器没有磁心，可以通过减少或增多线圈的匝数来降低或提高电感器的电感量，另外，改变线圈之间的疏密程度也能调节电感量。

2. 高频扼流圈

高频扼流圈又称高频阻流圈，它是一种电感量很小的电感器，常用在高频电路中，其电路符号如图 3-8a 所示。

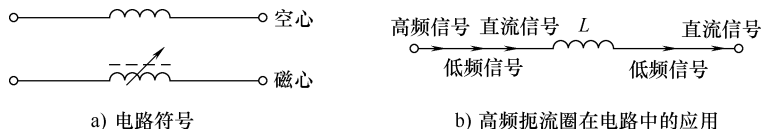


图 3-8 高频扼流圈

高频扼流圈又分为空心和磁心，空心高频扼流圈多用较粗铜线或镀银铜线绕制而成，可以通过改变匝数或匝距来改变电感量；磁心高频扼流圈用铜线在磁心材料上绕制一定的匝数构成，其电感量可以通过调节

磁心在线圈中的位置来改变。

高频扼流圈在电路中的作用是“阻高频，通低频”。如图 3-8b 所示，当高频扼流圈输入高、低频信号和直流信号时，高频信号不能通过，只有低频和直流信号能通过。

3. 低频扼流圈

低频扼流圈又称低频阻流圈，是一种电感量很大的电感器，常用在低频电路（如音频电路和电源滤波电路）中，其电路符号如图 3-9a 所示。

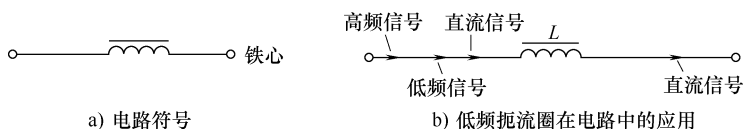


图 3-9 低频扼流圈

低频扼流圈是用较细的漆包线在铁心（硅钢片）或铜心上绕制很多匝数制成的。低频扼流圈在电路中的作用是“通直流，阻低频”。如图 3-9b 所示，当低频扼流圈输入高、低频和直流时，高、低频信号均不能通过，只有直流信号才能通过。

4. 色码电感器

色码电感器是一种高频电感线圈，它是在磁心上绕上一定匝数的漆包线，再用环氧树脂或塑料封装而制成的。色码电感器的的工作频率范围一般在 10kHz ~ 200MHz 之间，电感量在 0.1 ~ 3300 μ H 范围内。色码电感器是具有固定电感量的电感器，其电感量标注与识读方法与色环电阻器相同，但色码电感器的电感量单位为 μ H。

3.1.5 选用

在选用电感器时，要注意以下几点：

1) 选用电感器的电感量必须与电路要求一致，额定电流选大一些不会影响电路。

2) 选用电感器的工作频率要适合电路。低频电路一般选用硅钢片铁心或铁氧体磁心的电感器，而高频电路一般选用高频铁氧体磁心或空心的电感器。

3) 对于不同的电路，应该选用相应性能的电感器，在检修电路时，

如果遇到损坏的电感器，并且该电感器功能比较特殊，通常需要用同型号的电感器更换。

4) 在更换电感器时，不能随意改变电感器的线圈匝数、间距和形状等，以免电感器的电感量发生变化。

5) 对于可调电感器，为了让它在电路中达到较好的效果，可将电感器接在电路中进行调节。调节时可借助专门的仪器，也可以根据实际情况凭直觉调节，如调节电视机中与图像处理有关的电感器时，可一边调节电感器磁心，一般观察画面质量，质量最佳时调节就最准确。

6) 对于色码电感器或小型固定电感器，当电感量相同、额定电流相同时，一般可以代换。

7) 对于有屏蔽罩的电感器，在使用时需要将屏蔽罩与电路地连接，以提高电感器的抗干扰性。

3.1.6 电感器的型号命名方法

电感器的型号命名由3部分组成。

第一部分用字母表示主称为电感线圈。

第二部分用字母与数字混合或数字来表示电感量。

第三部分用字母表示偏差范围。

电感器的型号命名及含义见表3-1。

表 3-1 电感器的型号命名及含义

第一部分：主称		第二部分：电感量			第三部分：偏差范围	
字母	含义	数字与字母	数字	含义	字母	含义
L	电感线圈	2R2	2.2	2.2μH	J	±5%
		100	10	10μH	K	±10%
		101	100	100μH		
		102	1000	1mH	M	±20%
		103	10000	10mH		

3.2 变压器

3.2.1 外形与符号

变压器可以改变交流电压或交流电流的大小。常见变压器的实物外形及电路符号如图 3-10 所示。



图 3-10 变压器

3.2.2 结构、原理和功能

1. 结构

两组相距很近又相互绝缘的线圈就构成了变压器。变压器的结构如图 3-11 所示，从图中可以看出，变压器主要是由绕组和铁心组成。绕组通常是由漆包线（在表面涂有绝缘层的导线）或纱包线绕制而成，与输入信号连接的绕组称为一次绕组，输出信号的绕组称为二次绕组。

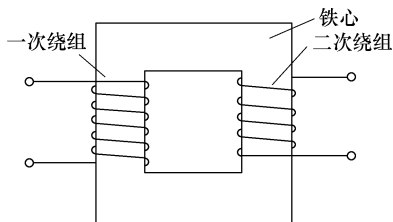


图 3-11 变压器的结构示意图

2. 工作原理

变压器是利用电—磁和磁—电转换原理工作的。下面以图 3-12 所示电路来说明变压器的工作原理。

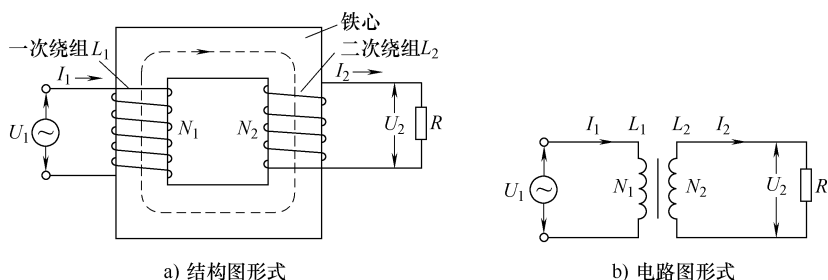


图 3-12 变压器工作原理说明图

当交流电压 U_1 送到变压器的一次绕组 L_1 两端时 (L_1 的匝数为 N_1)，有交流电流 I_1 流过 L_1 ， L_1 马上产生磁场，磁场的磁感线沿着导磁良好的铁心穿过二次绕组 L_2 (其匝数为 N_2)，有磁感线穿过 L_2 ， L_2 马上产生感应电动势，此时 L_2 相当一个电源，由于 L_2 与电阻 R 连接成闭合电路， L_2 就有交流电流 I_2 输出并流过电阻 R ， R 两端的电压为 U_2 。

变压器的一次绕组进行电—磁转换，而二次绕组进行磁—电转换。

3. 功能

变压器可以改变交流电压大小，也可以改变交流电流大小。

(1) 改变交流电压 变压器既可以升高交流电压，也能降低交流电压。在忽略电能损耗的情况下，变压器一次电压 U_1 、二次电压 U_2 与一次绕组匝数 N_1 、二次绕组匝数 N_2 的关系有：

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = n$$

n 称为匝数比或电压比，由上面的公式可知：

1) 当二次绕组匝数 N_2 多于一次绕组的匝数 N_1 时，二次电压 U_2 就会高于一次电压 U_1 。即 $n = \frac{N_1}{N_2} < 1$ 时，变压器可以提升交流电压，故电压比 $n < 1$ 的变压器称为升压变压器。

2) 当二次绕组匝数 N_2 少于一次绕组的匝数 N_1 时，变压器能降低交流电压，故 $n > 1$ 的变压器称为降压变压器。

3) 当二次绕组匝数 N_2 与一次绕组的匝数 N_1 相等时，变压器不会改变交流电压的大小，即一次电压 U_1 与二次电压 U_2 相等。这种变压器虽然不能改变电压大小，但能对一次、二次电路进行电气隔离，故 $n = 1$ 变压器常用作隔离变压器。

(2) 改变交流电流 变压器不但能改变交流电压的大小，还能改变交流电流的大小。由于变压器对电能损耗很少，可忽略不计，故变压器的输入功率 P_1 与输出功率 P_2 相等，即

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 \\ U_1 I_1 &= U_2 I_2 \\ \frac{U_1}{U_2} &= \frac{I_2}{I_1} \end{aligned}$$

从上面的公式可知，变压器的一次、二次电压与一、二次电流成反比，若提升了二次电压，就会使二次电流减小，降低二次电压，二次电流会增大。

综上所述，对于变压器来说，匝数越多的线圈两端电压越高，流过的电流越小。例如某个电源变压器上标注“输入电压 220V，输出电压 6V”，那么该变压器的一、二次绕组匝数比 $n = 220/6 = 110/3 \approx 37$ ，当将该变压器接在电路中时，二次绕组流出的电流是一次绕组流入电流的 37 倍。

3.2.3 特殊绕组变压器

前面介绍的变压器一、二次绕组分别只有一组绕组，实际应用中经常会遇到其他一些形式绕组的变压器。

1. 多绕组变压器

多绕组变压器的一、二次绕组由多个绕组组成，图 3-13a 所示是一种典型的多个绕组的变压器，如果将 L_1 作为一次绕组，那么 L_2 、 L_3 、 L_4 都是二次绕组， L_1 绕组上的电压与其他绕组的电压关系都满足 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ 。

例如 $N_1 = 1000$ 、 $N_2 = 200$ 、 $N_3 = 50$ 、 $N_4 = 10$ ，当 $U_1 = 220\text{V}$ 时， U_2 、 U_3 、 U_4 电压分别是 44V、11V 和 2.2V。

对于多绕组变压器，各绕组的电流不能按 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$ 来计算，而遵循 $P_1 = P_2 + P_3 + P_4$ ，即 $U_1 I_1 = U_2 I_2 + U_3 I_3 + U_4 I_4$ ，当某个二次绕组接的负载电阻很小时，该绕组流出的电流会很大，其输出功率就增大，其他二次绕组输出电流就会减小，功率也相应减小。

2. 多抽头变压器

多抽头变压器的一、二次绕组由两个绕组构成，除了本身具有 4 个

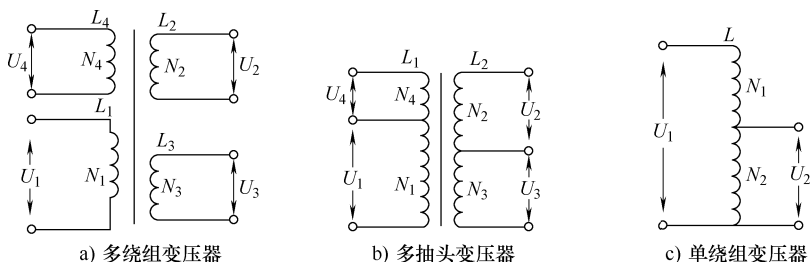


图 3-13 特殊绕组变压器

引出线外，还在绕组内部接出抽头，将一个绕组分成多个绕组。图 3-13b 所示是一种多抽头变压器。从图中可以看出，多抽头变压器由抽头分出的各绕组之间电气上是连通的，并且两个绕组之间共用一个引出线，而多绕组变压器各个绕组之间电气上是隔离的。如果将输入电压加到匝数为 N_1 的绕组两端，该绕组称为一次绕组，其他绕组就都是二次绕组，各绕组之间的电压关系都满足 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ 。

3. 单绕组变压器

单绕组变压器又称自耦变压器，它只有一个绕组，通过在绕组中引出抽头而产生一、二次绕组。单绕组变压器如图 3-13c 所示。如果将输入电压 U_1 加到整个绕组上，那么整个绕组就为一次绕组，其匝数为 $(N_1 + N_2)$ ，匝数为 N_2 的绕组为二次绕组， U_1 、 U_2 电压关系满足 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1 + N_2}{N_2}$ 。

3.2.4 种类

变压器种类较多，可以根据铁心、用途及工作频率等进行分类。

1. 按铁心种类分类

变压器按铁心种类不同，可分为空心变压器、磁心变压器和铁心变压器，它们的电路符号如图 3-14 所示。

空心变压器是指一、二次绕组没有绕制支架的变压器。磁心变压器是指一、二次绕组绕在磁心（如铁氧体材料）上构成的变压器。铁心变压器是指一、二次绕组绕在铁心（如硅钢片）构成的变压器。

2. 按用途分类

变压器按用途不同，可分为电源变压器、音频变压器、脉冲变压

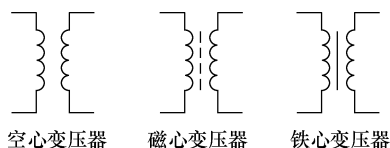


图 3-14 3 种变压器的电路符号

器、恒压变压器、自耦变压器和隔离变压器等。

3. 按工作频率分类

变压器按工作频率不同，可分为低频变压器、中频变压器和高频变压器。

(1) 低频变压器 低频变压器是指用在低频电路中的变压器。低频变压器铁心一般采用硅钢片，常见的铁心形状有 E 形、C 形和环形，如图 3-15 所示。

E 形铁心优点是成本低，缺点是磁路中的气隙较大，效率较低，工作时电噪声较大。C 形铁心是由两块形状相同的 C 形铁心组合而成，与 E 形铁心相比，其磁路中气隙较小，性能有所提高。环形铁心由冷轧硅钢带卷绕而成，磁路中无气隙，漏磁极小，工作时电噪声较小。



图 3-15 常见的变压器铁心

常见的低频变压器有电源变压器和音频变压器，如图 3-16 所示。



图 3-16 常见的低频变压器

电源变压器的功能是提升或降低电源电压。其中降低电压的降压变压器最为常见，一些手机充电器、小型录音机的外置电源内部都采用降

压电源变压器，这种变压器一次绕组匝数多，接 220V 交流电压，而二次绕组匝数少，输出较低的交流电压。在一些优质的功放机中，常采用环形电源变压器。

音频变压器用在音频信号处理电路中，如收音机、录音机的音频放大电路常用音频变压器来传输信号，当在两个电路之间加接音频变压器后，音频变压器可以将前级电路的信号最大程度传送到后级电路。



图 3-17 中周（中频变压器）

(2) 中频变压器 中频变压器是指用在中频电路中的变

压器。无线电设备采用的中频变压器又称中周，中周是将一、二次绕组绕在尼龙支架（内部装有磁心）上，并用金属屏蔽罩封装起来而构成的。中周的实物外形、结构与电路符号如图 3-17 所示。

中周常用在收音机和电视机等无线电设备中，主要用来选频（即从众多频率的信号中选出需要频率的信号），调节磁心在绕组中的位置可以改变一、二次绕组的电感量，就能选取不同频率的信号。

(3) 高频变压器 高频变压器是指用在高频电路中的变压器。高频变压器一般采用磁心或空心，其中采用磁心的更为多见，最常见的高频变压器就是收音机的磁性天线，其实物外形和电路符号如图 3-18 所示。

磁性天线的一、二次绕组都绕在磁棒上，一次绕组匝数很多，二次绕组匝数很少。磁性天线的功能是从空间接收无线电波，当无线电波穿过磁棒时，一次绕组上会感应出无线电波信号电压，

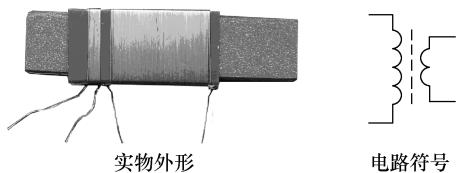


图 3-18 磁性天线（高频变压器）

该电压再感应到二次绕组上，二次绕组上的信号电压送到电路进行处理。磁性天线的磁棒越长，横截面积越大，接收下来的无线电波信号越强。

3.2.5 主要参数

变压器的主要参数有电压比、额定功率、频率特性和效率等。



1. 电压比

变压器的电压比是指一次绕组电压 U_1 与二次绕组电压 U_2 之比，它等于一次绕组匝数 N_1 与二次绕组 N_2 的匝数比，即 $n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ 。

降压变压器的电压比 $n > 1$ ，升压变压器的电压比 $n < 1$ ，隔离变压器的电压比 $n = 1$ 。

2. 额定功率

额定功率是指在规定工作频率和电压下，变压器能长期正常工作时的输出功率。变压器的额定功率与铁心横截面积、漆包线的线径等有关，变压器的铁心横截面积越大、漆包线径越粗，其输出功率就越大。

一般只有电源变压器才有额定功率参数，其他变压器由于工作电压低、电流小，通常不考虑额定功率。

3. 频率特性

频率特性是指变压器有一定的工作频率范围。不同工作频率范围的变压器一般不能互换使用，如不能用低频变压器代替高频变压器。当变压器在其频率范围外工作时，会出现温度升高或不能正常工作等现象。

4. 效率

效率是指在变压器接额定负载时，输出功率 P_2 与输入功率 P_1 的比值。变压器效率可用下面的公式计算：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

η 值越大，表明变压器损耗越小，效率越高，变压器的效率值一般在 60% ~ 100% 之间。

3.2.6 选用

1. 电源变压器的选用

选用电源变压器时，输入、输出电压要符合电路的需要，额定功率应大于电路所需的功率。如图 3-19 所示，该电路需要 6V 交流电压供电、最大输入电流为 0.4A，为了满足该电路的要求，可选用输入电压为 220V、输出电压为 6V、功率为 3VA ($3\text{VA} > 6\text{V} \times 0.4\text{A}$) 的电源变压器。

对于一般电源电路，可选用 E 形铁心的电源变压器，若是高保真音频功率放大器的电源电路，则应选用“C”形或环形铁心的变压器。对

于输出电压、输出功率相同且都是铁心材料的电源变压器，通常可以直接互换。

2. 其他类型的变压器

虽然变压器基本工作原理相同，但由于铁心材料、绕组形式和引脚排列等不同，造成变压器种类繁多。在设计制作电路时，选用变压器时要根据电路的需要，从结构、电压比、频率特性、工作电压和额定功率等方面考虑。在检修电路中，最好用同型号的变压器代换已损坏的变压器，若无法找到同型号，尽量找到参数相似变压器进行代换。

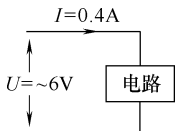


图 3-19 电源变压器选用例图

3.2.7 变压器的型号命名方法

国产变压器型号命名由 3 部分组成。

第一部分：用字母表示变压器的主称。

第二部分：用数字表示变压器的额定功率。

第三部分：用数字表示序号。

变压器的型号命名及含义见表 3-2。

表 3-2 变压器的型号命名及含义

第一部分：主称		第二部分：额定功率	第三部分：序号
字 母	含 义	用数字表示 变压器的额定功率	用数字表示 产品的序号
CB	音频输出变压器		
DB	电源变压器		
GB	高压变压器		
HB	灯丝变压器		
RB 或 JB	音频输入变压器		
SB 或 ZB	扩音机用定阻式音频输送变压器（线间变压器）		
SB 或 EB	扩音机用定压或自耦式音频输送变压器	用数字表示 变压器的额定功率	用数字表示 产品的序号
KB	开关变压器		

例如：DB-60-2 表示 60VA 电源变压器。

第 4 章

二 极 管

4.1 半导体和普通二极管

4.1.1 半导体

导电性能介于导体与绝缘体之间的材料称为半导体，常见的半导体材料有硅、锗和硒等。利用半导体材料可以制作各种各样的半导体器件，如二极管、晶体管、场效应晶体管和晶闸管等都是由半导体材料制作而成的。

1. 半导体的特性

半导体的主要特性有：

1) 掺杂性。当往纯净的半导体中掺入少量某些物质时，半导体的导电性就会大大增强。二极管、晶体管就是用掺入杂质的半导体制成的。

2) 热敏性。当温度上升时，半导体的导电能力会增强，利用该特性可以将某些半导体制成热敏器件。

3) 光敏性。当有光线照射半导体时，半导体的导电能力也会显著增强，利用该特性可以将某些半导体制成光敏器件。

2. 半导体的类型

半导体主要有 3 种类型：本征半导体、N 型半导体和 P 型半导体。

1) 本征半导体。纯净的半导体称为本征半导体，它的导电能力是很弱的，在纯净的半导体中掺入杂质后，导电能力会大大增强。

2) N 型半导体。在纯净半导体中掺入 5 价杂质（原子核最外层有 5 个电子的物质，如磷、砷和锑等）后，半导体中会有大量带负电荷的电子（因为半导体原子核最外层一般只有 4 个电子，所以可理解为当掺入 5 价元素后，半导体中的电子数偏多），这种电子偏多的半导体叫做“N

型半导体”。

3) P 型半导体。在纯净半导体中掺入 3 价杂质 (如硼、铝和镓) 后, 半导体中电子偏少, 有大量的空穴 (可以看作正电荷) 产生, 这种空穴偏多的半导体叫做 “P 型半导体”。

4.1.2 二极管

1. 构成

当 P 型半导体 (含有大量的正电荷) 和 N 型半导体 (含有大量的电子) 结合在一起时, P 型半导体中的正电荷向 N 型半导体中扩散, N 型半导体中的电子向 P 型半导体中扩散, 于是在 P 型半导体和 N 型半导体中间就形成一个特殊的薄层, 这个薄层称之为 PN 结, 该过程如图 4-1 所示。

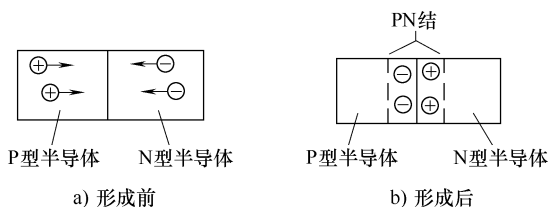


图 4-1 PN 结的形成

从含有 PN 结的 P 型半导体和 N 型半导体两端各引出一个电极并封装起来就构成了二极管, 与 P 型半导体连接的电极称为正极 (或阳极), 用 “+” 或 “A” 表示, 与 N 型半导体连接的电极称为负极 (或阴极), 用 “-” 或 “K” 表示。

2. 结构、符号和外形

二极管内部结构、电路符号和实物外形如图 4-2 所示。

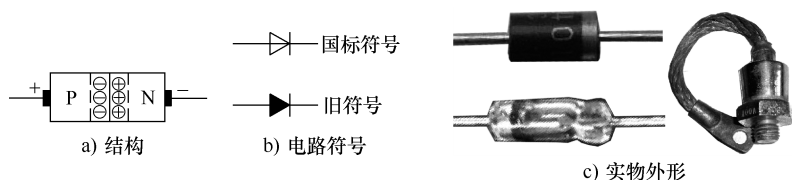


图 4-2 二极管

3. 性质

(1) 性质说明 下面通过分析图 4-3 中的两个电路来说明二极管的性质。

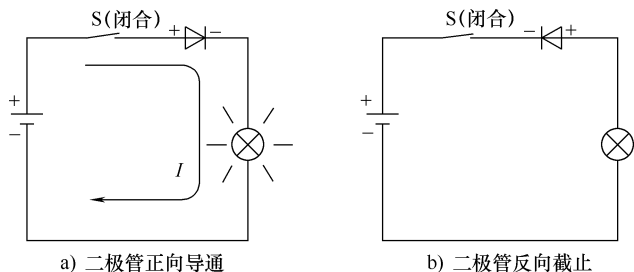


图 4-3 二极管的性质说明图

在图 4-3a 所示电路中，当闭合开关 S 后，发现灯泡会发光，表明有电流流过二极管，二极管导通；而在图 4-3b 所示电路中，当开关 S 闭合后灯泡不亮，说明无电流流过二极管，二极管不导通。通过观察这两个电路中二极管的接法可以发现，在图 4-3a 中，二极管的正极通过开关 S 与电源的正极连接，二极管的负极通过灯泡与电源负极相连，而在图 4-3b 中，二极管的负极通过开关 S 与电源的正极连接，二极管的正极通过灯泡与电源负极相连。

由此可以得出这样的结论：当二极管正极与电源正极连接，负极与电源负极相连时，二极管能导通，反之，二极管不能导通。二极管这种单方向导通的性质称二极管的单向导电性。

(2) 伏安特性曲线 在电子工程技术中，常采用伏安特性曲线来说明元器件的性质。伏安特性曲线又称电压电流特性曲线，它用来说明元器件两端电压与通过电流的变化规律。

二极管的伏安特性曲线用来说明加到二极管两端的电压 U 与通过电流 I 之间的关系。二极管的伏安特性曲线如图 4-4a 所示，图 4-4b、c 则是为解释伏安特性曲线而画的电路。

在图 4-4a 中的坐标图中，第一象限内的曲线表示二极管的正向特性，第三象限内的曲线则是表示二极管的反向特性。下面从两方面来说明伏安特性曲线。

1) 正向特性。正向特性是指给二极管加正向电压（二极管正极接

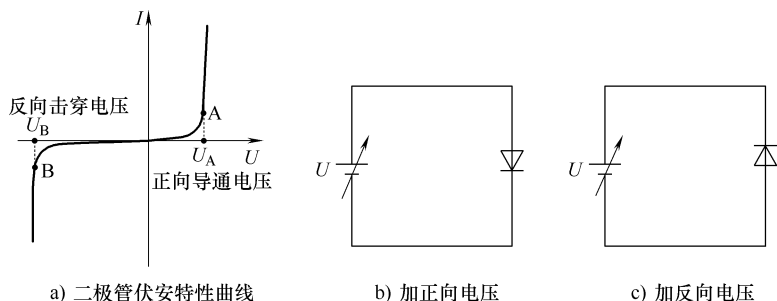


图 4-4 二极管的伏安特性曲线

高电位，负极接低电位）时的特性。在图 4-4b 电路中，电源直接接到二极管两端，此电源电压对二极管来说是正向电压。将电源电压 U 从 0V 开始慢慢调高，在刚开始时，由于电压 U 很低，流过二极管的电流极小，可认为二极管没有导通，只有当正向电压达到图 4-4a 所示的 U_A 电压时，流过二极管的电流急剧增大，二极管导通。这里的 U_A 电压称为正向导通电压，又称门电压（或阈值电压），不同材料的二极管，其门电压是不同的，硅材料二极管的门电压为 0.5 ~ 0.7V，锗材料二极管的门电压为 0.2 ~ 0.3V。

从上面的分析可以看出，二极管的正向特性是，当二极管加正向电压时不一定能导通，只有正向电压达到门电压时，二极管才能导通。

2) 反向特性。反向特性是指给二极管加反向电压（二极管正极接低电位，负极接高电位）时的特性。在图 4-4c 所示电路中，电源直接接到二极管两端，此电源电压对二极管来说是反向电压。将电源电压 U 从 0V 开始慢慢调高，在反向电压不高时，没有电流流过二极管，二极管不能导通。当反向电压达到图 4-4a 所示 U_B 电压时，流过二极管的电流急剧增大，二极管反向导通了，这里的 U_B 电压称为反向击穿电压，反向击穿电压一般很高，远大于正向导通电压，不同型号的二极管反向击穿电压不同，低的十几伏，高的有几千伏。普通二极管反向击穿导通后通常是损坏性的，所以反向击穿导通的普通二极管一般不能再使用。

从上面的分析可以看出，二极管的反向特性是，当二极管加较低的反向电压时不能导通，但反向电压达到反向击穿电压时，二极管会反向击穿导通。

二极管的正、反向特性与生活中的开门类似：当您从室外推门（门

是朝室内开的)时,如果力很小,门是推不开的,只有力气较大时门才能被推开,这与二极管加正向电压,只有达到门电压才能导通相似;当您从室内往外推门时,是很难推开的,但如果推门的力气非常大,门也会被推开,不过门被开的同时一般也就损坏了,这与二极管加反向电压时不能导通,但反向电压达到反向击穿电压(电压很高)时,二极管会击穿导通相似。

4. 主要参数

(1) 最大整流电流 I_{FM} 二极管长时间使用时允许流过的最大正向平均电流称为最大整流电流,或称作二极管的额定工作电流。当流过二极管的电流大于最大整流电流时,容易被烧坏。二极管的最大整流电流与 PN 结面积、散热条件有关。PN 结面积大的面接触型二极管的 I_{FM} 大,点接触型二极管的 I_{FM} 小;金属封装二极管的 I_{FM} 大,而塑封二极管的 I_{FM} 小。

(2) 最高反向工作电压 U_R 最高反向工作电压是指二极管正常工作时两端能承受的最高反向电压。最高反向工作电压一般为反向击穿电压的一半。在高压电路中需要采用 U_R 大的二极管,否则二极管易被击穿损坏。

(3) 最大反向电流 I_R 最大反向电流是指二极管两端加最高反向工作电压时流过的反向电流。该值越小,表明二极管的单向导电性越好。

(4) 最高工作频率 f_M 最高工作频率是指二极管在正常工作条件下的最高频率。如果加给二极管的信号频率高于该频率,二极管将不能正常工作, f_M 的大小通常与二极管的 PN 结面积有关,PN 结面积越大, f_M 越低,故点接触型二极管的 f_M 较高,而面接触型二极管的 f_M 较低。在无线电设备(如收音机、电视机等)中用作检波(解调)的二极管要求其最高工作频率高于所检波的信号频率,国产 2AP 系列锗二极管工作频率较高,达 40 ~ 400MHz。

(5) 反向恢复时间 t_r 当二极管加反向电压的瞬间并不会马上反向截止,而是会存在一定的反向电流,该电流一般用于中和 PN 结电荷并对形成的结电容反向充电,这个过程完成后反向电流减小到近似为 0,二极管才完全截止。反向恢复时间是指在规定的条件下,从二极管外加反向电压开始到反向电流下降到最大反向电流的 10% 所需的时间。

4.1.3 整流二极管与整流桥

1. 整流二极管

整流二极管的功能是将交流电转换成直流电。整流二极管的功能说明如图 4-5 所示。

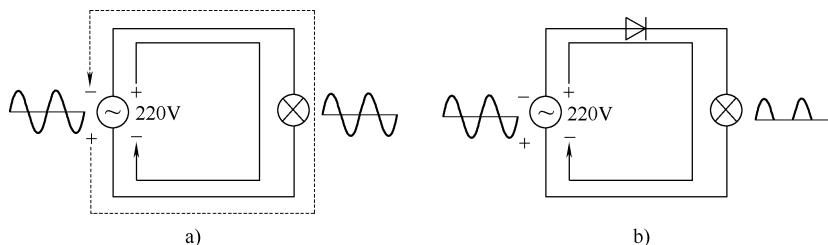


图 4-5 整流二极管的功能说明

在图 4-5a 中，将灯泡与 220V 交流电源直接连起来。当交流电为正半周时，其电压极性为上正下负，有正半周电流流过灯泡，电流路径为交流电源上正→灯泡→交流电源下负，如实线箭头所示；当交流电为负半周时，其电压极性变为上负下正，有负半周电流流过灯泡，电流路径为交流电源下正→灯泡→交流电源上负，如虚线箭头所示。由于正负半周电流均流过灯泡，灯泡发光，并且光线很亮。

在图 4-5b 中，在 220V 交流电源与灯泡之间串接一个二极管，会发现灯泡也亮，但亮度较暗，这是因为只有交流电源为正半周（极性为上正下负）时，二极管才导通，而交流电源为负半周（极性为下负上正）时，二极管不能导通，结果只有正半周交流电通过灯泡，故灯泡仍亮，但亮度较暗。图中的二极管允许交流电一个半周通过而阻止另一个半周通过，其功能称为整流，该二极管称为整流二极管。

用作整流功能的二极管要求最大整流电流和最高反向工作电压满足电路要求，如图 4-5b 中的整流二极管在交流电源负半周时截止，其两端要承受 300 多伏电压，如果选用的二极管最高反向工作电压低于该值，二极管会被反向击穿。

在选择工频（50Hz）电源整流二极管时，主要考虑最大整流电流、最高反向工作电压应满足电路要求，最好能达到电路最高值的 1.5 倍以上。

表 4-1 列出了一些常用整流二极管的主要参数。

表 4-1 常用整流二极管的主要参数

最高反向工作 电压/V 电流规格系列	50	100	200	300	400	500	600	800	1000
1A 系列	1N4001	1N4002	1N4003		1N4004		1N4005	1N4006	1N4007
1.5A 系列	1N5391	1N5392	1N5393	1N5394	1N5395	1N5396	1N5397	1N5398	1N5399
2A 系列	PS200	PS201	PS202		PS204		PS206	PS208	PS2010
3A 系列	1N5400	1N5401	1N5402	1N5403	1N5404	1N5405	1N5406	1N5407	1N5408
6A 系列	P600A	P600B	P600D		P600G		P600J	P600K	P600L

2. 整流桥

整流桥又称整流桥堆，它内部含有多个整流二极管，整流桥有半桥和全桥之分。

(1) 整流半桥 半桥内部有两个二极管，根据二极管连接方式不同，可分为共阴极半桥、共阳极半桥和独立二极管半桥，共阴极半桥、共阳极半桥有 3 个引脚，而独立二极管半桥有 4 个引脚，如图 4-6 所示。

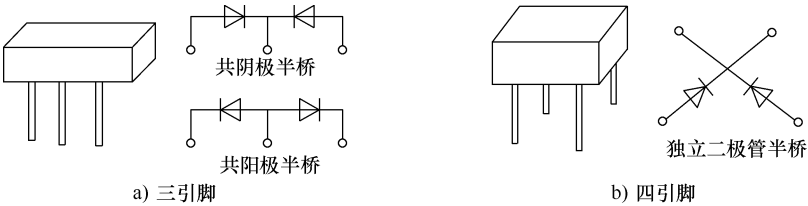


图 4-6 整流半桥

在检测三引脚整流半桥类型时，万用表拨到 $R \times 1k$ 挡，测量任意两引脚之间的阻值，当出现阻值小时，黑表笔接的为二极管的正极，红表笔接的为该二极管的负极，然后黑表笔不动，红表笔接余下的引脚，如果测得阻值也很小，则所测整流半桥的为共阳极，黑表笔接的为公共极，如果测得阻值为无穷大，则所测整流半桥的为共阴极，红表笔先接的引脚为公共极。

(2) 整流全桥 全桥内部有 4 个整流二极管，其实物外形与内部连

接如图 4-7 所示。全桥有 4 个引脚，标有“~”两个引脚为交流电压输入端，标有“+”和“-”分别为直流电压“+”和“-”输出端。



图 4-7 整流全桥

4.1.4 开关二极管

二极管具有导通和截止两种状态，它对应着开关的“开（接通）”和“关（断开）”两种状态，当二极管加正向偏压时，正极电压高于负极电压，二极管导通，相当于开关闭合，当极加反向偏压时，正极电压低于负极电压，二极管截止，相当于开关闭合。

1. 特点

在开关进行开、关状态切换时，需要一定的切换时间，同样的，二极管由一种状态转换到另一种状态也需要一定的时间，二极管从导通状态转换到截止状态所需的时间称为反向恢复时间，二极管从截止状态转换到导通状态所需的时间称为开通时间，二极管的反向恢复时间要远大于开通时间。故通常只给出二极管反向恢复时间。

为了达到良好的开、关效果，要求开关二极管的导通、截止切换速度很快，即要求开关二极管的反向恢复时间要小。开关二极管具有开关速度快、体积小、寿命长、可靠性高等特点，广泛应用于电子设备的开关电路、检波电路、高频和脉冲整流电路及自动控制电路中。

2. 种类

开关二极管种类很多，如普通开关二极管、高速开关二极管、超高速开关二极管、低功耗开关二极管、高反压开关二极管和硅电压开关二极管等。

1) 普通开关二极管。常用的国产普通开关二极管有 2AK 系列锗开关二极管（如 2AK1）。

2) 高速开关二极管。高速开关二极管较普通开关二极管的反向恢复时间更短，开、关频率更快。常用的国产高速开关二极管有 2CK 系列（2CK13），进口高速开关二极管有 1N 系列（如 1N4148）、1S 系列（如 1S2471）、1SS 系列（有引线塑封）和 RLS 系列（表面安装）。

3) 超高速开关二极管。常用的超高速二极管有 1SS 系列（有引线塑封）和 RLS 系列（表面封装）。

4) 低功耗开关二极管。低功耗开关二极管的功耗较低，但其零偏压电容和反向恢复时间值均较高速开关二极管低。常用的低功耗开关二极管有 RLS 系列（表面封装）和 1SS 系列（有引线塑封）。

5) 高反压开关二极管。高反压开关二极管的反向击穿电压均在 220V 以上，但其零偏压电容和反向恢复时间值相对较大。常用的高反压开关二极管有 RLS 系列（表面封装）和 1SS 系列（有引线塑封）。

6) 硅电压开关二极管。硅电压开关二极管是一种新型半导体器件，有单向电压开关二极管和双向电压开关二极管之分，主要应用于触发器、过电压保护电路、脉冲发生器及高压输出、延时、电子开关等电路。单向电压开关二极管也称转折二极管，其正向为负阻开关特性（即当外加电压升高到正向转折电压值时，开关二极管由截止状态变为导通状态，即由高阻转为低阻），反向为稳定特性；双向电压开关二极管的正向和反向均具有相同的负阻开关特性。

最常用的开关二极管有 1N4148、1N4448，两者均采用透明玻壳封装，靠近黑色环的引脚为负极，它们可以代换国产大部分 2CK 系列型号的开关二极管。1N4148、1N4448 的参数见表 4-2。

表 4-2 1N4148、1N4448 的参数

型号	参数 最高反 向工作 电压 U_{RM}/V	反向击 穿电压 U_{BR}/V	最大正 向压降 U_{FM}/V	最大正 向电流 I_{FM}/mA	平均整 流电流 I_d/mA	反向恢 复时间 t_{rr}/ns	最高 结温 $T_{JM}/^{\circ}C$	零偏结 电容 C_0/pF	最大 功耗 P_M/mW
1N4148	75	100	≤ 1	450	150	4	150	4	500
1N4448	75	100	≤ 1	450	150	4	150	5	500

3. 应用

开关二极管的应用举例如图 4-8 所示。从 A 点输入的 U_i 信号要到达 B 点输出，必须经过二极管 VD，当控制电压为正电压时，二极管导

通， U_i 信号经 C_1 、VD、 C_2 到达 B 点输出，当控制电压为负电压时，二极管截止， U_i 信号无法通过 VD，不能到达 B 点，二极管 VD 在该电路相当于一个开关，其通断受电压控制，故又称为电子开关。

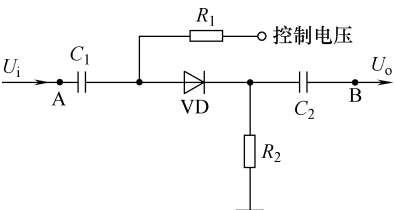


图 4-8 开关二极管的应用举例

4.1.5 二极管的型号命名方法

- 国产二极管的型号命名分为 5 个部分。
 - 第一部分用数字“2”表示主称为二极管。
 - 第二部分用字母表示二极管的材料与极性。
 - 第三部分用字母表示二极管的类别。
 - 第四部分用数字表示序号。
 - 第五部分用字母表示二极管的规格号。
- 国产二极管的型号命名及含义见表 4-3。

表 4-3 国产二极管的型号命名及含义

第一部分： 主称		第二部分： 材料与极性		第三部分： 类别		第四部分： 序号	第五部分： 规格号
数字	含义	字母	含义	字母	含义	用数字 表示同一 类别产品 序号	用字母 表示产品 规格、档 次
2	二极管	A	N 型锗材料	P	小信号管 (普通管)		
				W	电压调整管 和电压基准管 (稳压管)		
				L	整流堆		

(续)

第一部分： 主称		第二部分： 材料与极性		第三部分： 类别		第四部分： 序号	第五部分： 规格号
数字	含义	字母	含义	字母	含义	用 数 字 表 示 同 一 类 别 产 品 序 号	用 字 母 表 示 产 品 规 格、档 次
2	二极管	B	P 型锗材料	N	阻尼管		
				Z	整流管		
				U	光电管		
		C	N 型硅材料	K	开关管		
				C	变容管		
				V	混频检波管		
		D	P 型硅材料	JD	激光管		
				S	隧道管		
				CM	磁敏管		
		E	化合物材料	H	恒流管		
				Y	体效应管		
				EF	发光二极管		

举例：

2AP9（N 型锗材料普通二极管）	2CW56（N 型硅材料稳压二极管）
2—二极管	2—二极管
A—N 型锗材料	C—N 型硅材料
P—普通型	W—稳压管
9—序号	56—序号

4.2 稳压二极管

4.2.1 外形与符号

稳压二极管又称齐纳二极管或反向击穿二极管，它在电路中起稳压作用。稳压二极管的实物外形和电路符号如图 4-9 所示。

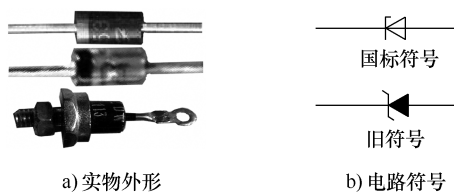
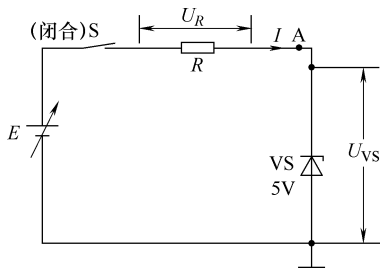


图 4-9 稳压二极管

4.2.2 工作原理

在电路中，稳压二极管可以稳定电压。要让稳压二极管起稳压作用，必须将它反接在电路中（即稳压二极管的负极接电路中的高电位，正极接低电位），稳压二极管在电路中正接时的性质与普通二极管相同。下面以图 4-10 所示的电路来说明稳压二极管的稳压原理。

图 4-10 中的稳压二极管 VS 的稳压值为 5V，若电源电压低于 5V，当闭合开关 S 时，VS 反向不能导通，无电流流过限流电阻 R ， $U_R = IR = 0$ ，电源电压途经 R 时， R 上没有压降，故 A 点电压与电源电压相等，VS 两端的电压 U_{VS} 与电源电压也相等，图 4-10 稳压二极管的稳压原理说明图例如 $E = 4V$ 时， U_{VS} 也为 4V，电



源电压在 5V 范围内变化时， U_{VS} 也随之变化。也就是说，当加到稳压二极管两端电压低于它的稳压值时，稳压二极管处于截止状态，无稳压功能。

若电源电压超过稳压二极管稳压值，如 $E = 8V$ ，当闭合开关 S 时，8V 电压通过电阻 R 送到 A 点，该电压超过稳压二极管的稳压值，VS 反向击穿导通，马上有电流流过电阻 R 和稳压管 VS，电流在流过电阻 R 时， R 产生 3V 的压降（即 $U_R = 3V$ ），稳压管 VS 两端的电压 $U_{VS} = 5V$ 。

若调节电源 E 使电压由 8V 上升到 10V 时，由于电压的升高，流过 R 和 VS 的电流都会增大，因流过 R 的电流增大， R 上的电压 U_R 也随之增大（由 3V 上升到 5V），而稳压二极管 VS 上的电压 U_{VS} 维持 5V 不变。

稳压二极管的稳压原理可概括为：当外加电压低于稳压二极管稳压

值时，稳压二极管不能导通，无稳压功能；当外加电压高于稳压二极管稳压值时，稳压二极管反向击穿，两端电压保持不变，其大小等于稳压值。注意，为了保护稳压二极管并使它有良好的稳压效果，需要给稳压二极管串接限流电阻。

4.2.3 应用

稳压二极管在电路通常有两种应用连接方式，如图 4-11 所示。

在图 4-11a 所示电路中，输出电压 U_o 取自稳压二极管 VS 两端，故 $U_o = U_{VS}$ ，当电源电压上升时，由于稳压二极管的稳压作用， U_{VS} 稳定不变，输出电压 U_o 也不变。也就是说在电源电压变化的情况下，稳压二极管两端电压始终保持不变，该稳定不变的电压可供给其他电路，使电路能稳定正常工作。

在图 4-11b 所示电路中，输出电压取自限流电阻 R 两端，当电源电压上升时，稳压二极管两端电压 U_{VS} 不变，限流电阻 R 两端电压上升，故输出电压 U_o 也上升。稳压二极管按这种接法是不能为电路提供稳定电压的。

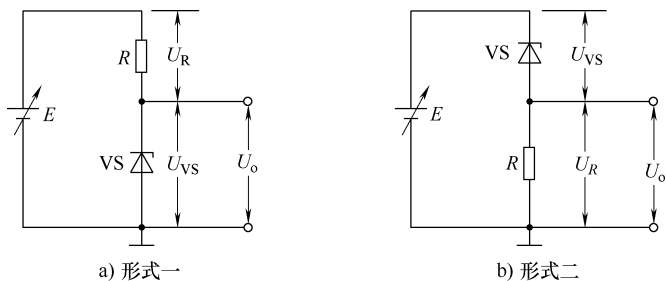


图 4-11 稳压二极管在电路中的两种应用连接形式

4.2.4 主要参数

稳压二极管的主要参数有稳定电压、最大稳定电流和最大耗散功率等。

(1) 稳定电压 稳定电压是指稳压二极管工作在反向击穿时两端的电压值。同一型号的稳压二极管，稳定电压可能为某一固定值，也可能在一定的数值范围内，例如 2CW15 的稳定电压是 7 ~ 8.8V，说明它的稳

定电压可能是7V，也可能是8V，还可能是8.8V等。

(2) **最大稳定电流** 最大稳定电流是指稳压二极管正常工作时允许通过的最大电流。稳压管在工作时，实际工作电流要小于该电流，否则会因长时间工作而损坏。

(3) **最大耗散功率** 最大耗散功率是指稳压二极管通过反向电流时允许消耗的最大功率，它等于稳定电压和最大稳定电流的乘积。在使用中，如果稳压二极管消耗的功率超过该功率就容易损坏。

4.2.5 选用

在选择稳压二极管时，要注意以下内容：

1) 选用的稳压二极管的稳定电压应与电路基准电压基本相同，最大稳定电流应高于电路最大负载电流的50%。

2) 用于过电压保护的稳压二极管，其稳定电压应与电路保护电压大小基本一致，不能过大或过小，否则起不到过电压保护作用。

3) 流过稳压二极管的反向电流不能超过其规定值，否则会过热而损坏。

4) 稳压二极管在电路中需要反接并且串接限流电阻使用。多个稳压二极管可串联使用，但不可并联使用。稳压二极管可与正向连接的硅二极管串联使用。

5) 在更换损坏的稳压二极管时，尽量换同型号或性能参数相同的稳压二极管。一般可用高耗散功率管代换低耗散功率管，但不能用低耗散功率管代换高耗散功率管。

4.3 变容二极管

4.3.1 外形与符号

变容二极管在电路中可以相当于电容，并且容量可调。变容二极管的实物外形和电路符号如图4-12所示。

4.3.2 工作原理

变容二极管与普通二极管一样，加正向电压时导通，加反向电压时

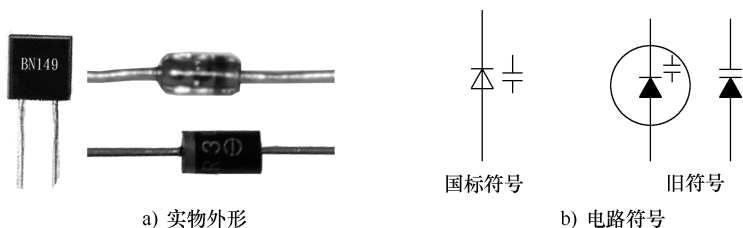


图 4-12 变容二极管

截止。在变容二极管两端加反向电压时，除了截止外，还可以相当于电容。变容二极管的性质说明如图 4-13 所示。

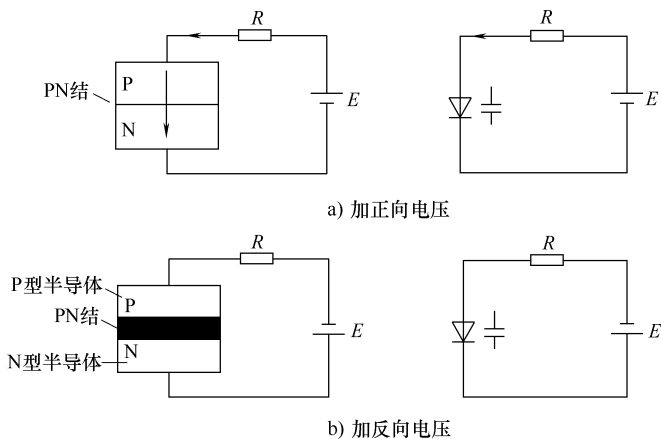


图 4-13 变容二极管的性质说明

(1) 两端加正向电压 当变容二极管两端加正向电压时，内部的 PN 结变薄，如图 4-13a 所示，当正向电压达到导通电压时，PN 结消失，对电流的阻碍消失，变容二极管像普通二极管一样正向导通。

(2) 两端加反向电压 当变容二极管两端加反向电压时，内部的 PN 结变厚，如图 4-13b 所示，PN 结阻止电流通过，故变容二极管处于截止状态，反向电压越高，PN 结越厚。PN 结阻止电流通过，相当于绝缘介质，而 P 型半导体和 N 型半导体分别相当于两个极板，也就是说处于截止状态的变容二极管内部会形成电容的结构，这种电容称为结电容。普通二极管的 P 型半导体和 N 型半导体都比较小，形成的结电容很

小，可以忽略，而变容二极管在制造时特意增大 P 型半导体和 N 型半导体的面积，从而增大结电容。

也就是说，当变容二极管两端加反向电压时，处于截止状态，内部会形成电容器的结构，此状态下的变容二极管可以看成是电容器。

4.3.3 容量变化规律

变容二极管加反向电压时可以相当于电容器，当反向电压改变时，其容量就会发生变化。下面以图 4-14 所示的电路和曲线来说明变容二极管容量调节规律。

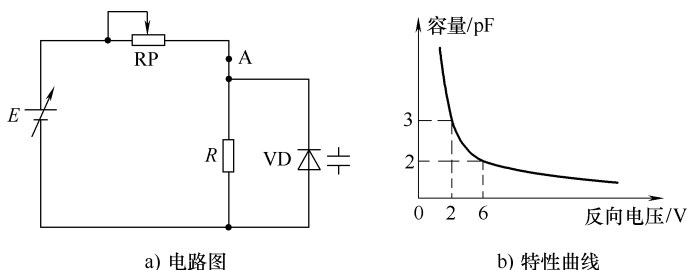


图 4-14 变容二极管的容量变化规律

在图 4-14a 所示电路中，变容二极管 VD 加有反向电压，电位器 RP 用来调节反向电压的大小。当 RP 滑动端右移时，加到变容二极管负端的电压升高，即反向电压增大，VD 内部的 PN 结变厚，内部的 P、N 型半导体距离变远，形成的电容容量变小；当 RP 滑动端左移时，变容二极管反向电压减小，VD 内部的 PN 结变薄，内部的 P、N 型半导体距离变近，形成的电容容量增大。

也就是说，当调节变容二极管反向电压大小时，其容量会发生变化，反向电压越高，容量越小，反向电压越低，容量越大。

图 4-14b 为变容二极管的特性曲线，它直观表示出变容二极管两端反向电压与容量变化规律，如当反向电压为 2V 时，容量为 3pF，当反向电压增大到 6V 时，容量减小到 2pF。

4.3.4 主要参数

1. 结电容

结电容指两端加一定反向电压时变容二极管 PN 结的容量。

2. 结电容变化范围

结电容变化范围是指变容二极管的反向电压从零开始变化到某一电压值时，其结电容的变化范围。

3. 最高反向电压

最高反向电压是指变容二极管正常工作时两端允许施加的最高反向电压值。使用时若超过该值，变容二极管容易被击穿。

常用变容二极管的主要参数见表 4-4。

表 4-4 常用变容二极管的主要参数

型 号	结电容(对应反向电压)/pF		电 容 比 率	工 作 频 率
	最小值	最大值		
303B	3 ~ 5 (25V)	18 (3V)	> 6	1000MHz
2AC1	2 (25V)	27 (3V)	> 7	50MHz
2CC1	3. 6 (25V)	20 (3V)	4 ~ 6	50MHz
2CB14	3 (25V)	18 ~ 30 (3V)	5 ~ 7	50MHz
2CC-32	2. 5 (25V)	25 (3V)	4. 5	> 800MHz
ISV-101	12 (10V)	32 (2. 5V)	2. 4	100MHz
AM-109	30 (9V)	460 (1V)	15	AM
BB-112	17 (6V)	12 (3V)	1. 8	AM
ISV-149	30 (8V)	540 (1V)	18	AM
S-153	2. 3 (9V)	16 (2V)	7	> 600MHz
MV-209	11 (9V)	33 (1. 5V)	3	UHF
KV-1236	30 (8V)	540 (1V)	20	AM
KV-1310	43 (8V)	93 (2V)	2. 3	> 100MHz
IS149	30 (8V)	540 (1V)	18	AM
S208	2. 7 (9V)	17 (4V)	> 4. 5	> 900MHz
MV2105	6 (9V)	22 (4V)	2. 5	UHF
DB300	6. 8 (25V)	18 (3V)	1. 8	50MHz
BB112	10 (25V)	180 (3V)	> 16	AM

4.4 双向触发二极管

4.4.1 外形与符号

双向触发二极管简称双向二极管，它在电路中可以双向导通。双向触发二极管的实物外形和电路符号如图 4-15 所示。

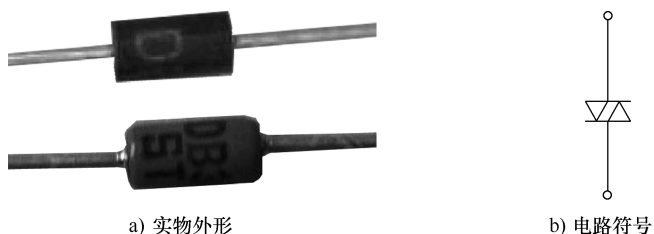


图 4-15 双向触发二极管

4.4.2 性质

普通二极管有单向导电性，而双向触发二极管具有双向导电性，但它的导通电压通常比较高。下面通过图 4-16 所示电路来说明双向触发二极管性质。

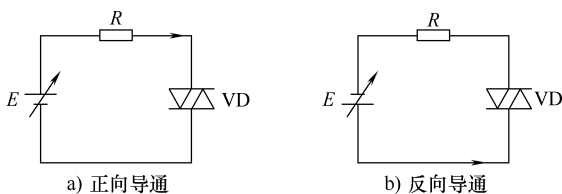


图 4-16 双向触发二极管的性质说明

1. 两端加正向电压时

在图 4-16a 所示电路中，将双向触发二极管 VD 与可调电源 E 连接起来。当电源电压较低时，VD 并不能导通，随着电源电压逐渐调高，当调到某一值时（如 30V），VD 马上导通，有从上往下的电流流过双向触发二极管。

2. 两端加反向电压时

在图 4-16b 所示电路中，将电源的极性调换后再与双向触发二极管 VD 连接起来。当电源电压较低时，VD 不能导通，随着电源电压的逐渐调高，当调到某一值时（如 30V），VD 马上导通，有从下向上的电流流过双向触发二极管。

综上所述，不管加正向电压还是反向电压，只要电压达到一定值，双向触发二极管就能导通。

4.4.3 特性曲线

双向触发二极管的性质可用图 4-17 所示的曲线来表示，坐标中的横轴表示双向触发二极管两端的电压，纵坐标表示流过双向触发二极管的电流。

从图 4-17 可以看出，当触发二极管两端加正向电压时，如果两端电压低于 U_{B1} 电压，流过的电流很小，双向触发二极管不能导通，一旦两端的正向电压达到 U_{B1} （称为触发电压），马上导通，有很大的电流流过双向触发二极管，同时双向触发二极管两端的电压会下降（低于 U_{B1} ）。

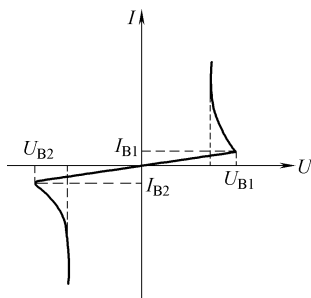


图 4-17 双向触发二极管的特性曲线

同样，当触发二极管两端加反向电压时，在两端电压低于 U_{B2} 电压时也不能导通，只有两端的正向电压达到 U_{B2} 时才能导通，导通后的双向触发二极管两端的电压会下降（低于 U_{B2} ）。

从图中还可以看出，双向触发二极管正、反向特性相同，具有对称性，故双向触发二极管极性没有正、负之分。

双向触发二极管的触发电压较高，30V 左右最为常见，双向触发二极管的触发电压一般有 20 ~ 60V、100 ~ 150V 和 200 ~ 250V 三个等级。在选用触发二极管时，主要考虑触发电压应符合电路要求。

4.5 肖特基二极管

4.5.1 外形与符号

肖特基二极管又称肖特基势垒二极管（SBD），其图形符号与普通二极管相同。常见的肖特基二极管实物外形如图 4-18a 所示，三引脚的肖特基二极管内部由两个二极管组成，其连接有多种方式，如图 4-18b 所示。

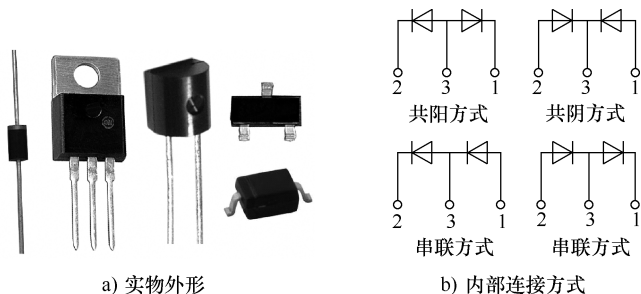


图 4-18 肖特基二极管

4.5.2 特点及应用场合

肖特基二极管是一种低功耗、大电流、超高速的半导体整流二极管，其工作电流可达几千安，而反向恢复时间可短至几纳秒。二极管的反向恢复时间越短，从截止转为导通的切换速度越快，普通整流二极管反向恢复时间长，无法在高频整流电路中正常工作。另外，肖特基二极管的正向导通电压较普通硅二极管略低，约 0.4V。

由于肖特基二极管导通、截止状态可高速切换，故主要用在高频电路中。由于面接触型的肖特基二极管工作电流大，故变频器、电动机驱动器、逆变器和开关电源等设备中整流二极管、续流二极管和保护二极管常采用面接触型的肖特基二极管；对于点接触型的肖特基二极管，其工作电流稍小，常在高频电路中用于检波或小电流整流。

肖特基二极管的缺点是反向耐压低，一般在 100V 以下，因此不能用在高电压电路中。肖特基二极管与普通二极管一样具有单向导电性，

其极性与好坏检测方法与普通二极管相同。

4.5.3 常用肖特基二极管的主要参数

表 4-5 列出了一些肖特基二极管的主要参数。

表 4-5 一些肖特基二极管的主要参数

参数 型号	额定整流 电流/A	峰值电流 /A	最大正向 压降/V	反向峰值 电压/V	反向恢复 时间/ns	封装形式	内部结构
D80-004	15	250	0.55	40	< 10	TO-3P	单管
D82-004	5	100	0.55	40	< 10	TO-220	共阴对管
MBR1545	15	150	0.7	45	< 10	TO-220	共阴对管
MBR2535	30	300	0.73	35	< 10	TO-220	共阴对管

4.6 快恢复二极管

4.6.1 外形与符号

快恢复二极管（FRD）、超快恢复二极管（SRD）的电路符号与普通二极管相同。常见的快恢复二极管实物外形如图 4-19a 所示。三引脚的快恢复二极管内部有两个二极管组成，其连接有共阳和共阴两种方式，如图 4-19b 所示。

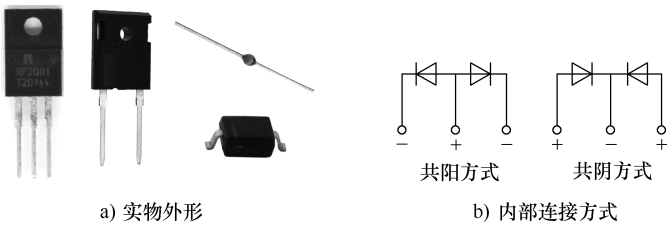


图 4-19 快恢复二极管

4.6.2 特点及应用场合

快恢复二极管是一种反向工作电压高、工作电流较大的高速半导体

二极管，其反向击穿电压可达几千伏，反向恢复时间一般为几百纳秒。快恢复二极管广泛应用于开关电源、不间断电源、变频器和电动机驱动器中，主要用作高频、高压和大电流整流或续流。

快恢复二极管的肖特基二极管区别主要有：

1) 快恢复二极管的反向恢复时间为几百纳秒，肖特基二极管更快，可达几纳秒。

2) 快恢复二极管的反向击穿电压高（可达几千伏），肖特基二极管的反向击穿电压低（一般在 100V 以下）。

3) 恢复二极管的功耗较大，而肖特基二极管功耗相对较小。

综上所述，快恢复二极管主要用在高电压小电流的高频电路中，肖特基二极管主要用在低电压大电流的高频电路中。

快恢复二极管与普通二极管一样具有单向导电性，其极性与好坏检测方法与普通二极管相同。

4.6.3 常用快恢复二极管的主要参数

表 4-6 列出了快恢复二极管的主要参数。

表 4-6 快恢复二极管的主要参数

参数 型号	反向恢复 时间 t_{r} /ns	额定电流 I_{d} /A	最大整流 电流 I_{FSM} /A	最大反向 电压 U_{RM} /V	结构形式
C20-04	400	5	70	400	单管
C92-02	35	10	20	200	共阴
MUR1680A	35	16	100	800	共阳
MUR3040PT	35	30	300	400	共阴
MUR30100	35	30	400	1000	共阳

4.7 瞬态电压抑制二极管

4.7.1 外形与符号

瞬态电压抑制二极管又称瞬态抑制二极管，简称 TVS。常见的瞬态抑制二极管实物外形如图 4-20a 所示。瞬态抑制二极管有单极型和双极

型之分，其电路符号如图 4-20b 所示。

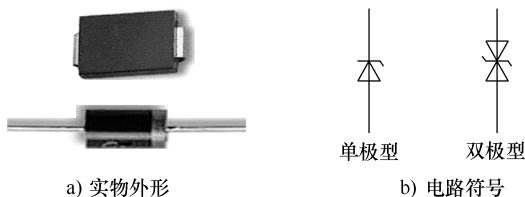


图 4-20 瞬态电压抑制二极管

4.7.2 性质

瞬态电压抑制二极管是一种二极管形式的高效能保护器件，当它两极间的电压超过一定值时，能以极快的速度导通，将两极间的电压固定在一个预定值上，从而有效地保护电子线路中的精密元器件。

单极型瞬态电压抑制二极管用来抑制单向瞬间高压，如图 4-21a 所示，当大幅度正脉冲的尖峰来时，单极型 TVS 反向导通，正脉冲被钳在固定值上，在大幅度负脉冲来时，若 B 点电压低于 -0.7V ，单极型 TVS 正向导通，B 点电压被钳在 -0.7V 。

双极型瞬态电压抑制二极管可抑制双向瞬间高压，如图 4-21b 所示，当大幅度正脉冲的尖峰来时，双极型 TVS 导通，正脉冲被钳在固定值上，当大幅度负脉冲的尖峰来时，双极型 TVS 导通，负脉冲被钳在固定值上。在实际电路中，双极型瞬态电压抑制二极管更为常用，如无特别说明，瞬态电压抑制二极管均是指双极型。

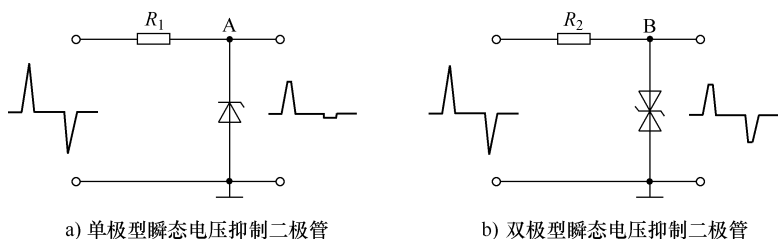


图 4-21 瞬态电压抑制二极管性质说明



4.7.3 选用

在选用瞬态电压抑制二极管时要注意以下几点：

- 1) 最大钳位电压 $U_{C(max)}$ 不能大于电路的最大允许安全电压，否则起不到钳位保护作用。
- 2) 最大反向工作电压 U_{RVM} 不低于电路的最大工作电压，一般可以选等于或略高于电路的最大工作电压。
- 3) 额定最大脉冲功率（短时功率）必须大于电路中出现最大瞬态浪涌功率。

第 5 章

晶 体 管

5.1 普通晶体管

5.1.1 外形与符号

晶体管是一种具有放大功能的半导体器件。图5-1a是一些常见的晶体管实物外形，晶体管的电路符号如图5-1b所示。

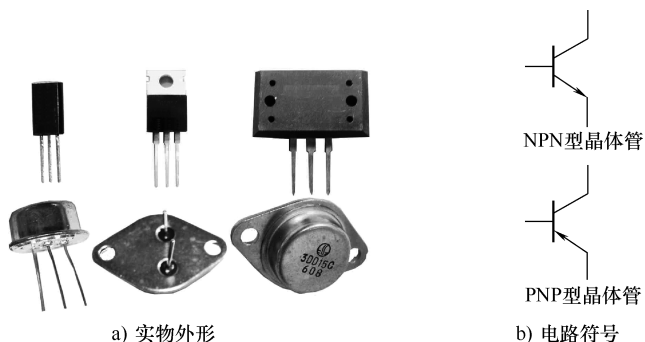


图 5-1 晶体管

5.1.2 结构

晶体管有 **PNP 型** 和 **NPN 型** 两种。PNP 型晶体管的构成如图 5-2 所示。

将两个 P 型半导体和一个 N 型半导体按图 5-2a 所示的方式结合在一起，两个 P 型半导体中的正电荷会向中间的 N 型半导体中移动，N 型半导体中的负电荷会向两个 P 型半导体移动，结果在 P、N 型半导体的交界处形成 PN 结，如图 5-2b 所示。

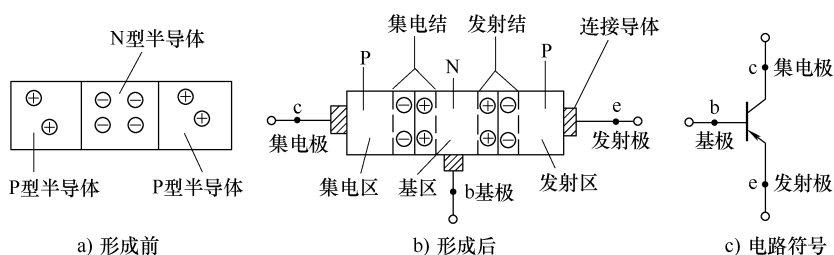


图 5-2 PNP 型晶体管的构成

在两个 P 型半导体和一个 N 型半导体上通过连接导体各引出一个电极，然后封装起来就构成了晶体管。晶体管 3 个电极分别称为集电极（用 c 或 C 表示）、基极（用 b 或 B 表示）和发射极（用 e 或 E 表示）。PNP 型晶体管的电路符号如图 5-2c 所示。

晶体管内部有两个 PN 结，其中基极和发射极之间的 PN 结称为发射结，基极与集电极之间的 PN 结称为集电结。两个 PN 结将晶体管内部作 3 个区，与发射极相连的区称为发射区，与基极相连的区称为基区，与集电极相连的区称为集电区。发射区的半导体掺入杂质多，故有大量的电荷，便于发射电荷；集电区掺入的杂质少且面积大，便于收集发射区送来的电荷；基区处于两者之间，发射区流向集电区的电荷要经过基区，故基区可控制发射区流向集电区电荷的数量，基区就像设在发射区与集电区之间的关卡。

NPN 型晶体管的构成与 PNP 型晶体管类似，它是由两个 N 型半导体和一个 P 型半导体构成的，具体如图 5-3 所示。

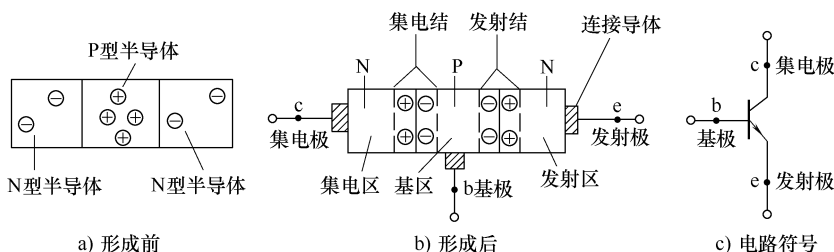


图 5-3 NPN 型晶体管的构成

5.1.3 电流、电压规律

单独晶体管是无法正常工作的，在电路中需要为晶体管各极提供电压，让它内部有电流流过，这样的晶体管才具有放大能力。为晶体管各极提供电压的电路称为偏置电路。

1. PNP 型晶体管的电流、电压规律

图 5-4a 为 PNP 型晶体管的偏置电路，从图 5-4b 可以清楚地看出晶体管内部电流情况。

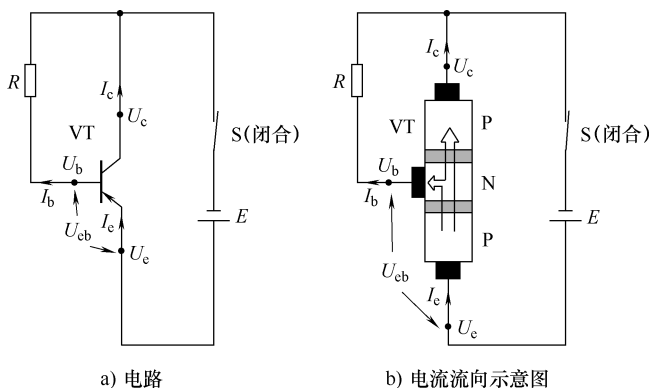


图 5-4 PNP 型晶体管的偏置电路

(1) 电流关系 在图 5-4 所示电路中，当闭合电源开关 S 后，电源输出的电流马上流过晶体管，晶体管导通。流经发射极的电流称为 I_e 电流，流经基极的电流称为 I_b 电流，流经集电极的电流称为 I_c 电流。

I_e 、 I_b 、 I_c 电流的途径分别是：

1) I_e 电流的途径：从电源的正极输出电流→电流流入晶体管 VT 的发射极→电流在晶体管内部部分作两路：一路从 VT 的基极流出，此为 I_b 电流；另一路从 VT 的集电极流出，此为 I_c 电流。

2) I_b 电流的途径：VT 基极流出电流→电流流经电阻 R→开关 S→流到电源的负极。

3) I_c 电流的途径：VT 集电极流出的电流→经开关 S→流到电源的负极。

从图 5-4b 可以看出，流入晶体管的 I_e 电流在内部分成 I_b 和 I_c 电

流，即发射极流入的 I_e 电流在内部分成 I_b 和 I_c 电流分别从基极和发射极流出。

不难看出，PNP 型晶体管的 I_e 、 I_b 、 I_c 电流的关系是 $I_b + I_c = I_e$ ，并且 I_e 电流要远大于 I_b 电流。

(2) 电压关系 在图 5-4 所示电路中，PNP 型晶体管 VT 的发射极直接接电源正极，集电极直接接电源的负极，基极通过电阻 R 接电源的负极。根据电路中电源正极电压最高、负极电压最低可判断出，晶体管发射极电压 U_e 最高，集电极电压 U_c 最低，基极电压 U_b 处于两者之间。

PNP 型晶体管 U_e 、 U_b 、 U_c 电压之间的关系是

$$U_e > U_b > U_c$$

$U_e > U_b$ 使发射区的电压较基区的电压高，两区之间的发射结（PN 结）直通，这样发射区大量的电荷才能穿过发射结到达基区。晶体管发射极与基极之间的电压（电位差） U_{eb} （ $U_{eb} = U_e - U_b$ ）称为发射结正向电压。

$U_b > U_c$ 可以使集电区电压较基区电压低，这样才能使集电区有足够的吸引力（电压越低，对正电荷吸引力越大），将基区内大量电荷吸引穿过集电结而到达集电区。

2. NPN 型晶体管的电流、电压规律

图 5-5 为 NPN 型晶体管的偏置电路。从图中可以看出，NPN 型晶体管的集电极接电源的正极，发射极接电源的负极，基极通过电阻接电源的正极，这与 PNP 型晶体管的连接正好相反。

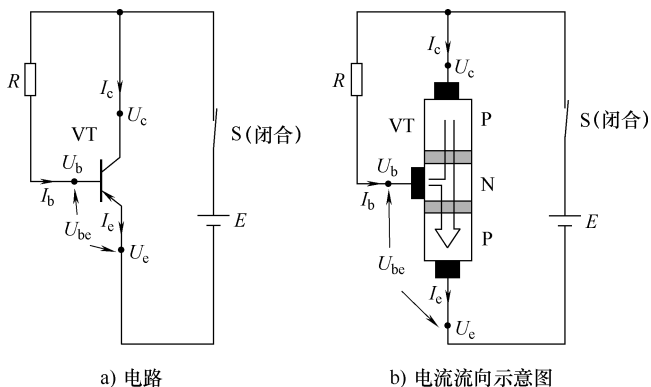


图 5-5 NPN 型晶体管的偏置电路

(1) 电流关系 在图 5-5 所示电路中, 当开关 S 闭合后, 电源输出的电流马上流过晶体管, 晶体管导通。流经发射极的电流称为 I_e 电流, 流经基极的电流称为 I_b 电流, 流经集电极的电流称为 I_c 电流。

I_e 、 I_b 、 I_c 电流的途径分别是:

1) I_b 电流的途径: 从电源的正极输出电流→开关 S→电阻 R →电流流入晶体管 VT 的基极→基区。

2) I_c 电流的途径: 从电源的正极输出电流→电流流入晶体管 VT 的集电极→集电区→基区。

3) I_e 电流的途径: 晶体管集电极和基极流入的 I_b 、 I_c 在基区汇合→发射区→电流从发射极输出→电源的负极。

不难看出, NPN 型晶体管 I_e 、 I_b 、 I_c 电流的关系是 $I_b + I_c = I_e$, 并且 I_e 电流要远大于 I_b 电流。

(2) 电压关系 在图 5-5 所示电路中, NPN 型晶体管的集电极接电源的正极, 发射极接电源的负极, 基极通过电阻接电源的正极。故 NPN 型晶体管 U_e 、 U_b 、 U_c 电压之间的关系是

$$U_e < U_b < U_c$$

$U_e > U_b$ 可以使基区电压较集电区电压低, 这样基区才能将集电区的电荷吸引穿过集电结而到达基区。

$U_b > U_e$ 可以使发射区的电压较基极的电压低, 两区之间的发射结 (PN 结) 导通, 基区的电荷才能穿过发射结到达发射区。

NPN 型晶体管基极与发射极之间的电压 U_{be} ($U_{be} = U_b - U_e$) 称为发射结正向电压。

5.1.4 放大原理

晶体管在电路中主要起放大作用, 下面以图 5-6 所示的电路来说明晶体管的放大原理。

1. 放大原理

给晶体管的 3 个极接上 3 个毫安表 mA_1 、 mA_2 和 mA_3 , 分别用来测量 I_e 、 I_b 、 I_c 电流的大小。RP 电位器用来调节 I_b 的大小, 如 RP 滑动端下移时阻值

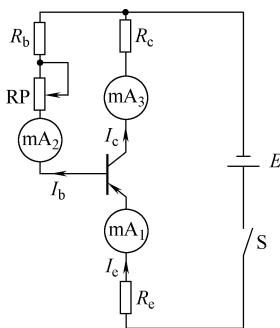


图 5-6 晶体管的放大原理说明图

变小, RP 对晶体管基极流出的 I_b 电流阻碍减小, I_b 增大。当调节 RP 改变 I_b 大小时, I_c 、 I_e 也会变化, 表 5-1 列出了调节 RP 时毫安表测得的 3 组数据。

表 5-1 3 组 I_e 、 I_b 、 I_c 电流数据 (单位: mA)

	第 一 组	第 二 组	第 三 组
基极电流 (I_b)	0.01	0.018	0.028
集电极电流 (I_c)	0.49	0.982	1.972
发射极电流 (I_e)	0.5	1	2

从表 5-1 可以看出:

1) 不论哪组测量数据都遵循 $I_b + I_c = I_e$ 。

2) 当 I_b 电流变化时, I_c 电流也会变化, 并且 I_b 有微小的变化, I_c 会有很大的变化。如 I_b 电流由 0.01 增大到 0.018mA, 变化量为 0.008 (0.018 - 0.01), I_c 电流则由 0.49 变化到 0.982, 变化量为 0.492mA (0.982 - 0.49), I_c 电流变化量是 I_b 电流变化量的 62 倍 (0.492/0.008 ≈ 62)。

也就是说, 当晶体管的基极电流 I_b 有微小的变化时, 集电极电流 I_c 会有很大的变化, I_c 电流的变化量是 I_b 电流变化量的很多倍, 这就是晶体管的放大原理。

2. 放大倍数

不同的晶体管, 其放大能力是不同的, 为了衡量晶体管放大能力的大小, 需要用到晶体管一个重要参数——放大倍数。晶体管的放大倍数可分为直流放大倍数和交流放大倍数。

晶体管集电极电流 I_c 与基极电流 I_b 的比值称为晶体管的直流放大倍数 (用 $\bar{\beta}$ 或 h_{FE} 表示), 即

$$\bar{\beta} = \frac{\text{集电极电流 } I_c}{\text{基极电流 } I_b}$$

例如在表 5-1 中, 当 $I_b = 0.018\text{mA}$ 时, $I_c = 0.982\text{mA}$, 晶体管直流放大倍数为

$$\bar{\beta} = \frac{0.982}{0.018} \approx 55$$

万用表可测量晶体管的放大倍数, 它测得放大倍数 h_{FE} 值实际上就

是晶体管直流放大倍数。

晶体管集电极电流变化量 ΔI_c 与基极电流变化量 ΔI_b 的比值称为交流放大倍数（用 β 或 h_{fe} 表示），即

$$\beta = \frac{\text{集电极电流变化量 } \Delta I_c}{\text{基极电流变化量 } \Delta I_b}$$

以表 5-1 的第一、二组数据为例：

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \frac{0.982 - 0.49}{0.018 - 0.01} = \frac{0.492}{0.008} = 61.5$$

测量晶体管交流放大倍数至少需要知道两组数据，这样比较麻烦，而测量直流放大倍数比较简单（只要测一组数据即可），又因为直流放大倍数与交流放大倍数相近，所以通常只用万用表测量直流放大倍数来判断晶体管放大能力的大小。

5.1.5 3 种状态说明

晶体管的状态有 3 种：截止、放大和饱和。下面通过图 5-7 所示的电路来说明晶体管的 3 种状态。

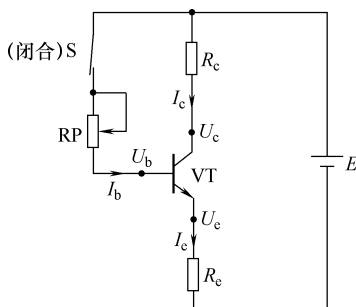


图 5-7 晶体管的 3 种状态说明图

1. 3 种状态下的电流特点

当开关 S 处于断开状态时，晶体管 VT 的基极供电切断，无 I_b 电流流入，晶体管内部无法导通， I_c 电流无法流入晶体管，晶体管发射极也就没有 I_e 电流流出。

晶体管无 I_b 、 I_c 、 I_e 电流流过的状态（即 I_b 、 I_c 、 I_e 都为 0）称为截止状态。

当开关 S 闭合后, 晶体管 VT 的基极有 I_b 电流流入, 晶体管内部导通, I_c 电流从集电极流入晶体管, 在内部 I_b 、 I_c 电流汇合后形成 I_e 电流从发射极流出。此时调节电位器 RP, I_b 电流变化, I_e 电流也会随之变化, 例如当 RP 滑动端下移时, 其阻值减小, I_b 电流增大, I_e 也增大, 两者满足 $I_e = \beta I_b$ 的关系。

晶体管有 I_b 、 I_c 、 I_e 电流流过且满足 $I_e = \beta I_b$ 的状态称为放大状态。

在开关 S 处于闭合状态时, 如果将电位器 RP 的阻值不断调小, 晶体管 VT 的基极电流 I_b 就会不断增大, I_e 电流也随之不断增大, 当 I_b 、 I_e 电流增大到一定程度时, I_b 再增大, I_e 不会随之再增大, 而是保持不变, 此时 $I_e < \beta I_b$ 。

晶体管有很大的 I_b 、 I_c 、 I_e 电流流过且满足 $I_e < \beta I_b$ 的状态称为饱和状态。

综上所述, 当晶体管处于截止状态时, 无 I_b 、 I_c 、 I_e 电流通过; 当晶体管处于放大状态时, 有 I_b 、 I_c 、 I_e 电流通过, 并且 I_b 变化时 I_e 也会变化 (即 I_b 电流可以控制 I_e 电流), 晶体管具有放大功能; 当晶体管处于饱和状态时, 有很大的 I_b 、 I_c 、 I_e 电流通过, I_b 变化时 I_e 不会变化 (即 I_b 电流无法控制 I_e 电流)。

2. 3 种状态下 PN 结的特点和各极电压关系

晶体管内部有集电结和发射结, 在不同状态下这两个 PN 结的特点是不同的。由于 PN 结的结构与二极管相同, 在分析时为了方便, 可将晶体管的两个 PN 结画成二极管的符号。图 5-8 为 NPN 型和 PNP 型晶体管的 PN 结示意图。

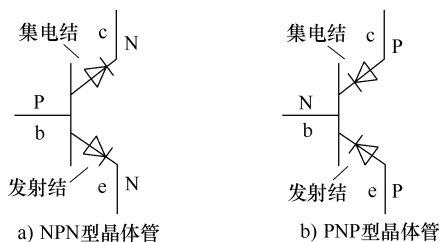


图 5-8 晶体管的 PN 结示意图

当晶体管处于不同状态时, 集电结和发射结也有相对应的特点。不论 NPN 型或 PNP 型晶体管, 在 3 种状态下的发射结和集电结特点都有:

- 1) 处于放大状态时，发射结正偏导通，集电结反偏。
- 2) 处于饱和状态时，发射结正偏导通，集电结也正偏。
- 3) 处于截止状态时，发射结反偏或正偏但不导通，集电结反偏。

正偏是指 PN 结的 P 端电压高于 N 端电压，正偏导通除了要满足 PN 结的 P 端电压大于 N 端电压外，还要求电压要大于门电压（0.2 ~ 0.3V 或 0.5 ~ 0.7V），这样才能让 PN 结导通。反偏是指 PN 结的 N 端电压高于 P 端电压。

不管哪种类型的晶体管，只要记住晶体管某种状态下两个 PN 结的特点，就可以很容易推断出晶体管在该状态下的电压关系，反之，也可以根据晶体管各极电压关系推断出该晶体管处于什么状态。

例如在图 5-9a 所示电路中，NPN 型晶体管 VT 的 $U_c = 4V$ 、 $U_b = 2.5V$ 、 $U_e = 1.8V$ ，其中 $U_b - U_e = 0.7V$ 使发射结正偏导通， $U_c > U_b$ 使集电结反偏，该晶体管处于放大状态。

在图 5-9b 所示电路中，NPN 型晶体管 VT 的 $U_c = 4.7V$ 、 $U_b = 5V$ 、 $U_e = 4.3V$ ， $U_b - U_e = 0.7V$ 使发射结正偏导通， $U_b > U_c$ 使集电结正偏，晶体管处于饱和状态。

在图 5-9c 所示电路中，PNP 型晶体管 VT 的 $U_c = 6V$ 、 $U_b = 6V$ 、 $U_e = 0V$ ， $U_e - U_b = 0V$ 使发射结零偏不导通， $U_b > U_c$ 集电结反偏，晶体管处于截止状态。从该电路的电流情况也可以判断出晶体管是截止的，假设 VT 可以导通，从电源正极输出的 I_c 电流经 R_c 从发射极流入，在内部分成 I_b 、 I_e 电流， I_b 电流从基极流出后就无法继续流动（不能通过 RP 返回到电源的正极，因为电流只能从高电位往低电位流动），所以 VT 的 I_b 电流实际上是不存在的，无 I_b 电流，也就无 I_c 电流，故 VT 处于截止状态。

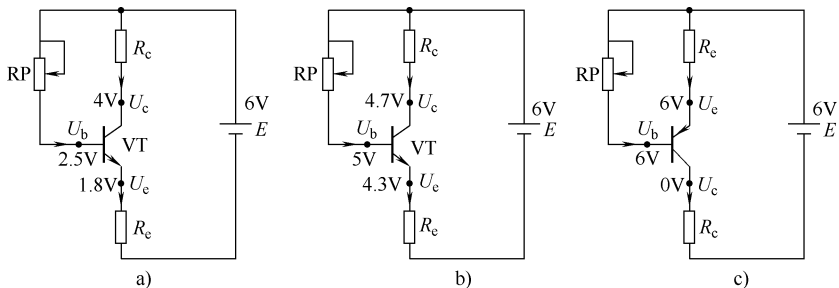


图 5-9 根据 PN 结的情况推断晶体管的状态

晶体管 3 种状态的各种特点见表 5-2。

表 5-2 晶体管 3 种状态的特点

	放 大	饱 和	截 止
电流关系	I_b 、 I_c 、 I_e 大小正常, 且 $I_c = \beta I_b$	I_b 、 I_c 、 I_e 很大, 且 $I_c < \beta I_b$	I_b 、 I_c 、 I_e 都为 0
PN 结特点	发射结正偏导通, 集电结反偏	发射结正偏导通, 集电结正偏	发射结反偏或正偏不导通, 集电结反偏
电压关系	对于 NPN 型晶体管, $U_c > U_b > U_e$ 对于 PNP 型晶体管, $U_e > U_b > U_c$	对于 NPN 型晶体管 $U_b > U_c > U_e$, 对于 PNP 型晶体管, $U_c > U_b > U_e$	对于 NPN 型晶体管, $U_c > U_b$, $U_b < U_e$ 或 U_{be} 小于门电压 对于 PNP 型晶体管, $U_c < U_b$, $U_b > U_e$ 或 U_{eb} 小于门电压

3. 3 种状态的应用说明

晶体管可以工作在 3 种状态, 处于不同状态时可以实现不同的功能。当晶体管处于放大状态时, 可以对信号进行放大, 当晶体管处于饱和与截止状态时, 可以当成电子开关使用。

(1) 放大状态的应用 在图 5-10a 所示电路中, 电阻 R_1 的阻值很大, 流进晶体管基极的电流 I_b 较小, 从集电极流入的 I_c 电流也不是很大, I_b 电流变化时 I_c 也会随之变化, 故晶体管处于放大状态。

当闭合开关 S 后, 有 I_b 电流通过 R_1 流入晶体管 VT 的基极, 马上有 I_c 电流流入 VT 的集电极, 从 VT 的发射极流出 I_e 电流, 晶体管有正常大小的 I_b 、 I_c 、 I_e 流过, 处于放大状态。这时如果将一个微弱的交流信号经 C_1 送到晶体管的基极, 晶体管就会对它进行放大, 然后从集电极输出幅度大的信号, 该信号经 C_2 送往后续电路。

要注意的是, 当交流信号从基极输入, 经晶体管放大后从集电极输出时, 晶体管除了对信号放大外, 还会对信号进行倒相再从集电极输出。若交流信号从基极输入、从发射极输出时, 晶体管对信号会进行放大但不会倒相, 如图 5-10b 所示。

(2) 饱和与截止状态的应用 晶体管饱和与截止状态的应用如图 5-11 所示。

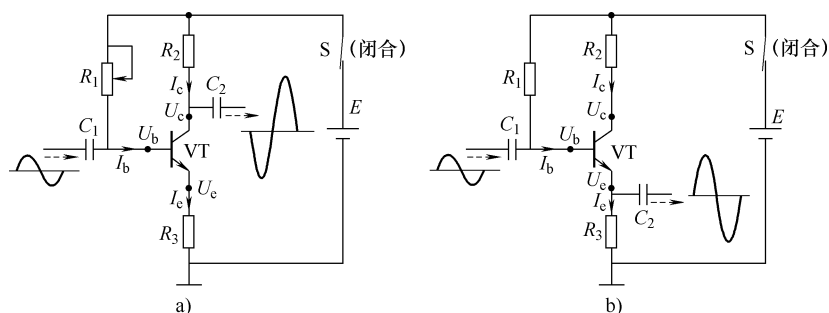


图 5-10 晶体管放大状态的应用

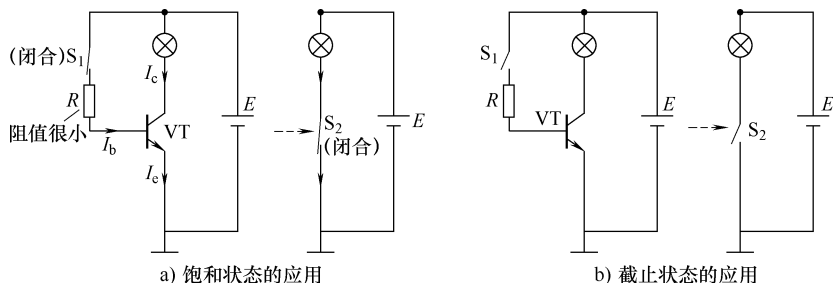


图 5-11 晶体管饱和与截止状态的应用

在图 5-11a 中，当闭合开关 S_1 后，有 I_b 电流经 S_1 、 R 流入晶体管 VT 的基极，马上有 I_c 电流流入 VT 的集电极，然后从发射极输出 I_e 电流，由于 R 的阻值很小，故 VT 基极电压很高， I_b 电流很大， I_c 电流也很大，并且 $I_c < \beta I_b$ ，晶体管处于饱和状态。晶体管进入饱和状态后，从集电极流入、发射极流出的电流很大，晶体管集射极之间就相当于一个闭合的开关。

在图 5-11b 中，当开关 S_1 断开后，晶体管基极无电压，基极无 I_b 电流流入，集电极无 I_c 电流流入，发射极也就没有 I_e 电流流出，晶体管处于截止状态。晶体管进入截止状态后，集电极电流无法流入、发射极无电流流出，晶体管集射极之间就相当于一个断开的开关。

晶体管处于饱和与截止状态时，集射极之间分别相当于开关闭合与断开，由于晶体管具有这种性质，故在电路中可以当做电子开关（依靠电压来控制通断），当晶体管基极加较高的电压时，集射极之间导通，当基极不加电压时，集射极之间断开。

5.1.6 主要参数

1. 电流放大倍数

晶体管的电流放大倍数有直流电流放大倍数和交流电流放大倍数。晶体管集电极电流 I_c 与基极电流 I_b 的比值称为晶体管的直流电流放大倍数（用 $\bar{\beta}$ 或 h_{FE} 表示），即

$$\bar{\beta} = \frac{\text{集电极电流 } I_c}{\text{基极电流 } I_b}$$

晶体管集电极电流变化量 ΔI_c 与基极电流变化量 ΔI_b 的比值称为交流电流放大倍数（用 β 或 h_{fe} 表示），即

$$\beta = \frac{\text{集电极电流变化量 } \Delta I_c}{\text{基极电流变化量 } \Delta I_b}$$

上面两个电流放大倍数的含义虽然不同，但两者近似相等，故在以后应用时一般不加区分。晶体管的 β 值过小，电流放大作用小， β 值过大，晶体管的稳定性会变差，在实际使用时，一般选用 β 在 40 ~ 80 的管子较为合适。

2. 穿透电流 I_{CEO}

穿透电流又称集电极-发射极反向电流，它是指在基极开路时，给集电极与发射极之间加一定的电压，由集电极流往发射极的电流。穿透电流的大小受温度的影响较大，晶体管的穿透电流越小，热稳定性越好，通常锗管的穿透电流较硅管的要大些。

3. 集电极最大允许电流 I_{CM}

当晶体管的集电极电流 I_c 在一定的范围内变化时，其 β 值基本保持不变，但当 I_c 增大到某一值时， β 值会下降。使电流放大倍数 β 明显减小（约减小到 $\frac{2}{3}\beta$ ）的 I_c 电流称为集电极最大允许电流。晶体管用作放大时， I_c 电流不能超过 I_{CM} 。

4. 击穿电压 $U_{BR(CEO)}$

击穿电压 $U_{BR(CEO)}$ 是指基极开路时，允许加在集-射极之间的最高电压。在使用时，若晶体管集-射极之间的电压 $U_{CE} > U_{BR(CEO)}$ ，集电极电流 I_c 将急剧增大，这种现象称为击穿。击穿的晶体管属于永久损坏，故选用晶体管时要注意其反向击穿电压不能低于电路的电源电压，一般晶体管的反向击穿电压应是电源电压的两倍。



5. 集电极最大允许功耗 P_{CM}

晶体管在工作时，集电极电流流过集电结时会产生热量，从而使晶体管温度升高。在规定的散热条件下，集电极电流 I_C 在流过晶体管集电极时允许消耗的最大功率称为集电极最大允许功耗 P_{CM} （又称最大耗散功率）。当晶体管的实际功耗超过 P_{CM} 时，温度会上升很高而烧坏。晶体管散热良好时的 P_{CM} 较正常时要大。

集电极最大允许功耗 P_{CM} 可用下面的公式计算：

$$P_{CM} = I_C U_{CE}$$

晶体管的 I_C 电流过大或 U_{CE} 电压过高都会导致功耗过大而超出 P_{CM} 。晶体管手册上列出的 P_{CM} 值是在常温下 25℃ 时测得的。硅管的集电结上限温度为 150℃ 左右，锗管为 70℃ 左右，使用时应注意不要超过此值，否则管子将损坏。

6. 特征频率 f_T

在工作时，晶体管的放大倍数 β 会随着信号的频率升高而减小。使晶体管的放大倍数 β 下降到 1 的频率称为晶体管的特征频率。当信号频率 f 等于 f_T 时，晶体管对该信号将失去电流放大功能，信号频率大于 f_T 时，晶体管将不能正常工作。

5.1.7 中小功率晶体管的选用

在选择中小功率晶体管时要注意以下几点：

1) 晶体管的特征频率 f_T 为电路工作频率的 3 倍以上。在选用时，要知道晶体管所在的电路的工作频率大概范围，AM（中波）收音机最高频率 2MHz 左右，FM（调频）收音机的最高频率为 120MHz 左右，电视机的 VHF 频段最高频率为 250MHz 左右、UHF 频段的最高频率接近 1000MHz。一般要求晶体管的特征频率为电路工作频率的 3 倍以上。硅高频晶体管的特征频率一般不低于 30MHz，故在音频电路选用晶体管管时可不考虑特征频率。

2) 晶体管的击穿电压 $U_{BR(CEO)}$ 不小于电路的电源电压。若晶体管接的为阻性负载，所选晶体管反向击穿电压应大于或等于电源的最高电压，若晶体管接的为感性负载（线圈），晶体管工作时线圈易产生很高的反峰电压（约为电源电压的 2~8 倍），为安全起见，所选晶体管的反向击穿电压应大于可能出现的最高反峰电压。

3) 晶体管的集电极最大允许电流 I_{CM} 应大于所在电路可能出现的最大电流。若晶体管用作小信号放大, 晶体管工作时的 I_c 电流很小, 而小功率晶体管的 I_{CM} 一般大于 30mA, 都满足这个条件, 如果晶体管用作驱动继电器和大功率扬声器, 就要了解继电器的吸合电流和扬声器功率, 再来确定晶体管的 I_{CM} 。

4) 晶体管的集电极最大允许功耗 P_{CM} 应大于晶体管工作时可能出现的最大功率 P ($P = U_c I_c$)。

5) 中小功率晶体管的型号很多, 如果找不到较合适的晶体管, 可按“大能代小”的原则进行选择, 即 $U_{BR(CEO)}$ 高的晶体管可代换 $U_{BR(CEO)}$ 低的, I_{CM} 大的晶体管可代换 I_{CM} 小的晶体管, 代换时要兼顾多个参数同时满足。

5.1.8 大功率晶体管的选用

在选择大功率晶体管时要注意以下几点:

1) 大功率晶体管通常用作低功率放大, 如果不是用在高频发射电路(如电台广播发射机、雷达等), 选用大功率晶体管时不用考虑特征频率。

2) 大功率晶体管的 $U_{BR(CEO)}$ 、 I_{CM} 参数选择考虑与中小晶体管相同。

3) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 是大功率晶体管选用考虑重点, 尽量留有余量。大功率晶体管一般需带良好的散热器, 一只带散热器的大功率晶体管可承受 40 ~ 50W 功率, 若不带散热器, 可能只承受几瓦功率。

5.1.9 晶体管的型号命名方法

国产晶体管型号由 5 部分组成。

第一部分用数字“3”表示主称三极管。

第二部分用字母表示晶体管的材料和极性。

第三部分用字母表示晶体管的类别。

第四部分用数字表示同一类型产品的序号。

第五部分用字母表示规格号。

国产晶体管型号命名及含义见表 5-3。

表 5-3 国产晶体管型号命名及含义

第一部分： 主称		第二部分： 晶体管的材料和极性		第三部分： 类别		第四部分： 序号	第五部分： 规格号
数字	含义	字母	含义	字母	含义	用数字表示同一类型产品的序号	用字母 A 或 B、C、D…表示同一型号的器件的档次等
3	三极管	A	锗材料， PNP 型	G	高频小功率管		
				X	低频小功率管		
		B	锗材料， NPN 型	A	高频大功率管		
				D	低频大功率管		
		C	硅材料， PNP 型	T	闸流管		
				K	开关管		
		D	硅材料， NPN 型	V	微波管		
				B	雪崩管		
		E	化合物材料	J	阶跃恢复管		
				GT	光敏晶体管		

5.2 特殊晶体管

5.2.1 带阻晶体管和带阻尼晶体管

1. 带阻晶体管

带阻晶体管是指基极和发射极接有电阻并封装为一体的晶体管。带阻晶体管常用在电路中作为电子开关。带阻晶体管外形和电路符号如图 5-12 所示。

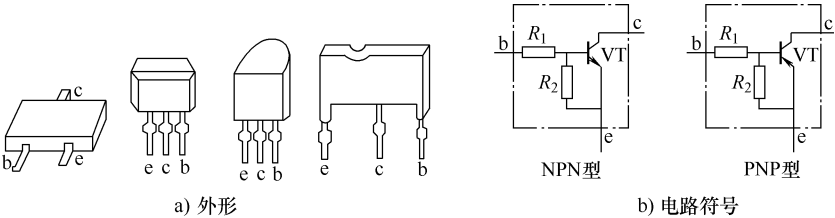


图 5-12 带阻晶体管

2. 带阻尼晶体管

带阻尼晶体管是指在集电极和发射极之间接有二极管并封装为一体的晶体管。带阻尼晶体管功率很大，常用在彩电和电脑显示器的扫描输出电路中。带阻尼晶体管外形和电路符号如图 5-13 所示。

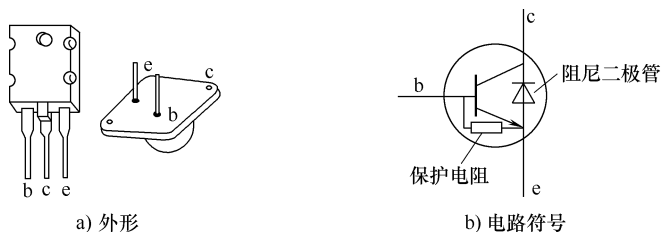


图 5-13 带阻尼晶体管

3. 选用

带阻尼晶体管损坏后，应尽量更换同型号或性能相近的管子，若更换性能相近的管子后出现发热，可在管子 B、E 极之间并联一个 36Ω 的电阻。若一时找不到合适的带阻尼晶体管，可用一只参数基本类似的大功率晶体管并在 C、E 极之间并联一只快恢复二极管来代换，其反向耐压一般要求大于电源电压的 8~10 倍。

5.2.2 达林顿晶体管

1. 外形与符号

达林顿晶体管又称复合晶体管，它是由两只或两只以上晶体管组成并封装为一体的晶体管。达林顿晶体管外形如图 5-14a 所示，图 5-14b 是两种常见的达林顿晶体管电路符号。

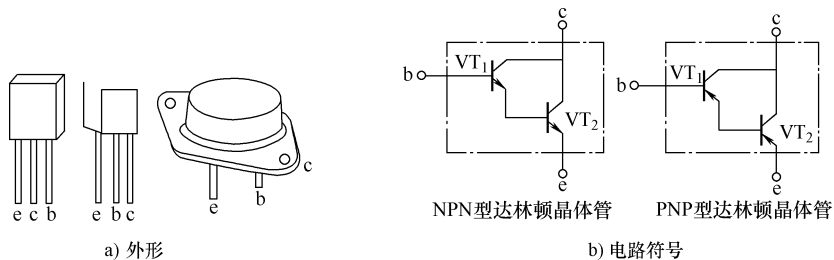


图 5-14 达林顿晶体管

2. 工作原理

与普通晶体管一样，达林顿晶体管也需要给各极提供电压，让各极有电流流过，才能正常工作。达林顿晶体管具有放大倍数高、热稳定性好和简化放大电路等优点。图 5-15 是一种典型的达林顿晶体管偏置电路。

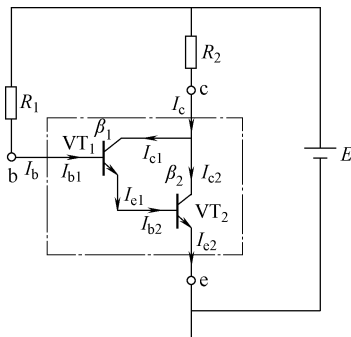


图 5-15 达林顿晶体管的偏置电路

接通电源后，达林顿晶体管 C、B、E 极得到供电，内部的 VT_1 、 VT_2 均导通， VT_1 的 I_{b1} 、 I_{c1} 、 I_{e1} 电流和 VT_2 的 I_{b2} 、 I_{c2} 、 I_{e2} 电流途径见图 5-15 中箭头所示。达林顿晶体管的放大倍数 β 与 VT_1 、 VT_2 的放大倍数 β_1 、 β_2 有如下的关系：

$$\begin{aligned}
 \beta &= \frac{I_c}{I_b} = \frac{I_{c1} + I_{c2}}{I_{b1}} = \frac{\beta_1 \cdot I_{b1} + \beta_2 \cdot I_{b2}}{I_{b1}} \\
 &= \frac{\beta_1 \cdot I_{b1} + \beta_2 \cdot I_{e1}}{I_{b1}} \\
 &= \frac{\beta_1 \cdot I_{b1} + \beta_2 (I_{b1} + \beta_1 \cdot I_{b1})}{I_{b1}} \\
 &= \frac{\beta_1 \cdot I_{b1} + \beta_2 \cdot I_{b1} + \beta_2 \beta_1 \cdot I_{b1}}{I_{b1}} \\
 &= \beta_1 + \beta_2 + \beta_2 \beta_1 \\
 &\approx \beta_2 \beta_1
 \end{aligned}$$

即达林顿晶体管的放大倍数为

$$\beta = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdots \beta_n$$

第 6 章

光 电 器 件

6.1 发光二极管

6.1.1 普通发光二极管

1. 外形与符号

发光二极管是一种电-光转换器件，能将电信号转换成光。图 6-1a 是一些常见的发光二极管的实物外形，图 6-1b 为发光二极管的电路符号。

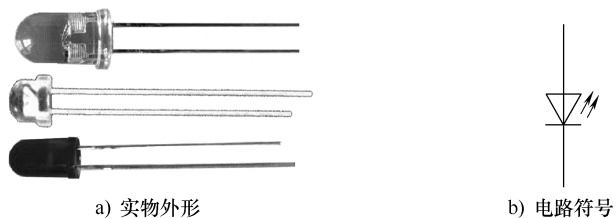


图 6-1 发光二极管

2. 性质

发光二极管在电路中需要正接才能工作。下面以图 6-2 所示的电路来说明发光二极管的性质。

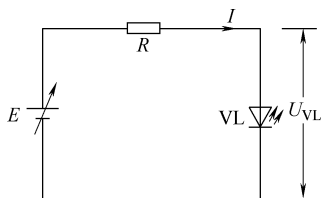


图 6-2 发光二极管的性质说明图

在图 6-2 中, 可调电源 E 通过电阻 R 将电压加到发光二极管 VL 两端, 电源正极对应 VL 的正极, 负极对应 VL 的负极。将电源 E 的电压由 0 开始慢慢调高, 发光二极管两端电压 U_{VL} 也随之升高, 在电压较低时发光二极管并不导通, 只有 U_{VL} 达到一定值时, VL 才导通, 此时的 U_{VL} 电压称为发光二极管的导通电压。发光二极管导通后有电流流过, 就开始发光, 流过的电流越大, 发出的光线越强。

不同颜色的发光二极管, 其导通电压有所不同, 红外线发光二极管最低, 略高于 1V, 红光二极管为 1.5 ~ 2V, 黄光二极管约 2V, 绿光二极管为 2.5 ~ 2.9V, 高亮度蓝光、白光二极管导通电压一般达到 3V 以上。

发光二极管正常工作时的电流较小, 小功率的发光二极管工作电流一般在 5 ~ 30mA, 若流过发光二极管的电流过大, 容易被烧坏。发光二极管的反向耐压也较低, 一般在 10V 以下。在焊接发光二极管时, 应选用功率在 25W 以下的电烙铁, 焊接点应离管帽 4mm 以上。焊接时间不要超过 4s, 最好用镊子夹住管脚散热。

3. 常用的驱动方式及限流电阻的阻值计算

发光二极管既可以用直流驱动, 也可以用交流驱动。发光二极管常用直流驱动电路如图 6-3 所示, 在采用图 6-3b 所示的晶体管驱动时, 晶体管相当于一个开关 (电子开关), 当基极为高电平时晶体管会导通, 相当于开关闭合, 发光二极管有电流通过而发光。

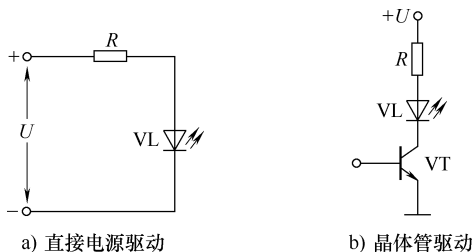


图 6-3 发光二极管的两种直流驱动电路

图 6-4 为发光二极管的两种常用交流驱动电路, 图 6-4a 所示电路在发光二极管两端反向并联一只普通二极管 VD, 其作用是在交流电压为负半周 (U 电压下正上负) 时导通, 若无 VD, 在交流电压负半周时会反向击穿发光二极管 VL, 虽然有电阻 R 的限流不致被烧坏, 但发光

二极管会因反复反向击穿而缩短寿命，为了充分利用电能，可以将保护二极管换成一只发光二极管，如图 6-4b 所示。

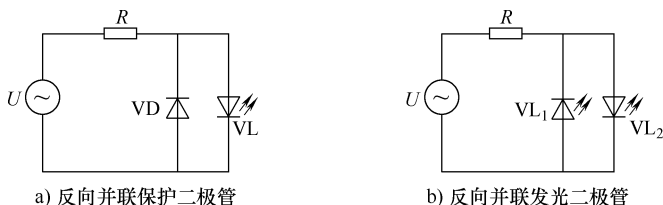


图 6-4 发光二极管的两种交流驱动电路

发光二极管在使用时必须接限流电阻，限流电阻的阻值可按 $R = (U - U_F) / I_F$ 计算， U 为加到发光二极管和限流电阻两端的电压， U_F 为发光二极管的正向导通电压（1 ~ 3V，可用数字万用表二极管档测量获得）， I_F 为发光二极管的正向工作电流（5 ~ 30mA，一般取 10mA）。

6.1.2 双色发光二极管

1. 外形与符号

双色发光二极管可以发出多种颜色的光线。双色发光二极管有两引脚和三引脚之分，常见的双色发光二极管实物外形如图 6-5a 所示，图 6-5b 为双色发光二极管的电路符号。

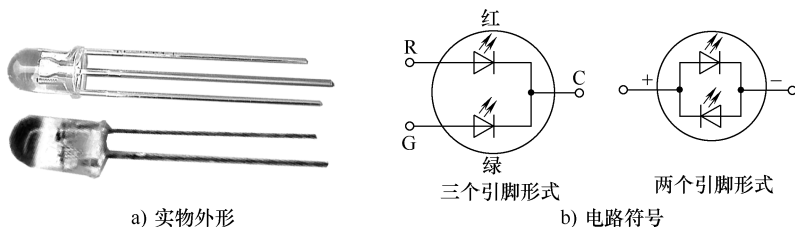


图 6-5 双色发光二极管

2. 工作原理

双色发光二极管是将两种颜色的发光二极管制作封装在一起构成的，常见的有红绿双色发光二极管。双色发光二极管内部两个二极管的连接方式有两种：一是共阳或共阴形式（即正极或负极连接成公共端），二是正负连接形式（即一只二极管正极与另一只二极管负极连接）。共

阳或共阴形式双色二极管有 3 个引脚，正负连接式双色二极管有两个引脚。

下面以图 6-6 所示的电路来说明双色发光二极管工作原理。

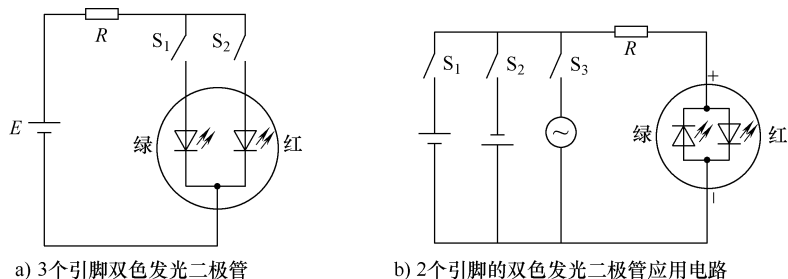


图 6-6 双色发光二极管工作原理说明图

图 6-6a 为 3 个引脚的双色发光二极管应用电路。当闭合开关 S_1 时，有电流流过双色发光二极管内部的绿管，双色发光二极管发出绿色光，当闭合开关 S_2 时，电流通过内部红管，双色发光二极管发出红光，若两个开关都闭合，红、绿管都亮，双色二极管发出的混合色光——黄光。

图 6-6b 为两个引脚的双色发光二极管应用电路。当闭合开关 S_1 时，有电流流过红管，双色发光二极管发出红色光；当闭合开关 S_2 时，电流通过内部绿管，双色发光二极管发出绿光；当闭合开关 S_3 时，由于交流电源极性周期性变化，它产生的电流交替流过红、绿管，红、绿管都亮，双色二极管发出的光线呈红、绿混合色——黄色。

6.1.3 三原色发光二极管

1. 三原色与混色方法

(1) 三原色 实践证明，自然界几乎所有的颜色都可以由红、绿、蓝 3 种颜色按不同的比例混合而成，反之，自然界绝大多数颜色都可以分解成红、绿、蓝三种颜色，因此将红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 3 种的颜色称为三原色。

(2) 混色方法 用三原色几乎可以混出自然界几乎所有的颜色。常见的混色方法如下：

1) 直接相加混色法。直接相加混色法是指将两种或三种基色按一

定的比例混合而得到另一种颜色的方法。图 6-7 为三原色混色环，三个大圆环分别表示红、绿、蓝三种基色，圆环重叠表示颜色混合，例如将红色和绿色等量直接混合在一起可以得到黄色，将红色和蓝色等量直接混合在一起可以得到紫色，将红、绿、蓝三种颜色等量直接混合在一起可得到白色。三种基色在混合时，若混合比例不同，得到的颜色将会不同，由此可混出各种各样的颜色。

2) 空间相加混色法。当三种基色相距很近，而观察距离又较远时，就会产生混色效果。空间相加混色如图 6-8 所示，图 6-8a 为三个点状发光体，分别可发出 R（红）、G（绿）、B（蓝）三种光，当它们同时发出三种颜色光时，如果观察距离较远，无法区分出三个点，会觉得是一个大点，那么感觉该点为白色，如果 R、G 发光体同时发光时，会觉得该点为黄色；图 6-8b 为三个条状发光体，当它们同时发出三种颜色光时，如果观察距离较远，会觉得是一个粗条，那么该粗条为白色，如果 R、G 发光体同时发光时，会觉得粗条为黄色。彩色电视机、液晶显示器等就是利用空间相加混色法来显示彩色图像的。

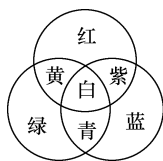


图 6-7 三原色混色环

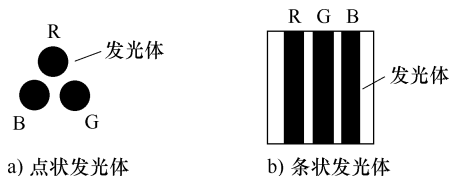


图 6-8 空间相加混色

3) 时间相加混色法。如果将三种基色光按先后顺序照射到同一表面上，只要基色光切换速度足够快，由于人眼的视觉暂留特性（物体在人眼前消失后，人眼会觉得该物体还在眼前，这种印象约能保留 0.04s 时间），人眼就会获得三种基色直接混合而形成的混色感觉。如图 6-9 所示，先将一束红光照射到一个圆上，让它呈红色，然后迅速移开红光，再将绿光照射到该圆上，只要两者切换速度足够快（不超过 0.04s），绿光与人眼印象中保留的红色相混合，会觉得该圆为黄色。

2. 三原色发光二极管

(1) 外形与图形符号 三原色发光二极管又称全彩发光二极管，其实物外形和电路符号如图 6-10 所示。

(2) 工作原理 三原色发光二极管是将红、绿、蓝三种颜色的发光

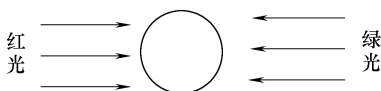
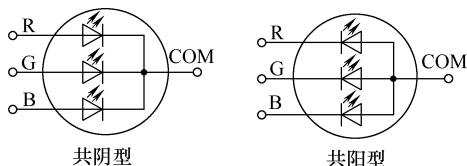


图 6-9 时间相加混色



a) 实物外形



b) 电路符号

图 6-10 三原色发光二极管

二极管制作并封装在一起构成的，在内部将三个发光二极管的负极（共阴型）或正极（共阳型）连接在一起，再接一个公共引脚。下面以图 6-11 所示的电路来说明共阴型三原色发光二极管的工作原理。

当闭合开关 S_1 时，有电流流过内部的 R 发光二极管，三原色发光二极管发出红光；当闭合开关 S_2 时，有电流流过内部的 G 发光二极管，三原色发光二极管发出绿光；若 S_1 、 S_3 两个开关都闭合， R 、 B 发光二极管都亮，三原色发光二极管发出混合色光——紫光。

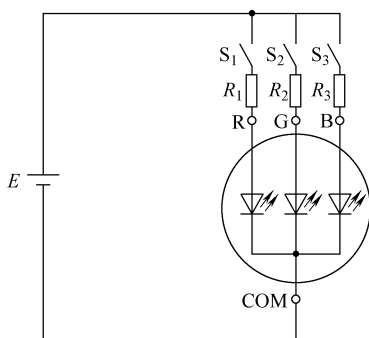


图 6-11 三原色发光二极管
工作原理说明图

6.1.4 闪烁发光二极管

1. 外形与结构

闪烁发光二极管在通电后会时亮时暗闪烁发光。图 6-12a 为常见的闪烁发光二极管，图 6-12b 为闪烁发光二极管的结构。

2. 工作原理

闪烁发光二极管是将集成电路（IC）和发光二极管制作并封装在一起。下面以图 6-13 所示的电路来说明闪烁发光二极管的工作原理。



图 6-12 闪烁发光二极管

当闭合开关 S 后，电源电压通过电阻 R 和开关 S 加到闪烁发光二极管两端，该电压提供给内部的 IC 作为电源，IC 马上开始工作，工作后输出时高时低的电压（即脉冲信号），发光二极管时亮时暗，闪烁发光。常见的闪烁发光二极管有红、绿、橙、黄 4 种颜色，它们的正常工作电压为 $3 \sim 5.5\text{V}$ 。

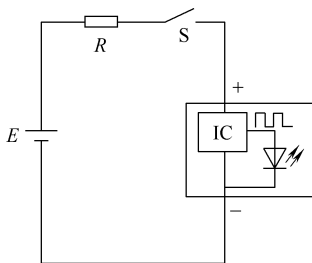


图 6-13 闪烁发光二极管
工作原理说明图

6.1.5 红外线发光二极管

1. 外形与图形符号

红外线发光二极管通电后会发出人眼无法看见的红外光，家用电器的遥控器采用红外线发光二极管发射遥控信号。红外线发光二极管的实物外形与电路符号如图 6-14 所示。

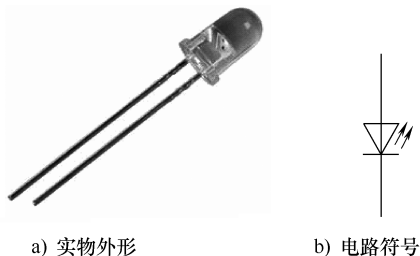


图 6-14 红外线发光二极管

2. 常见红外线发光二极管的主要参数

常见的红外线发光二极管为 HG 型、GL 型、SIM 型、SIR 型和 HIR

型，表 6-1 列出了一些 HG 型红外线发光二极管的主要参数。

表 6-1 一些 HG 型红外线发光二极管的主要参数

型号	最大功率 P_M/mW	最大正向电流 I_{FM}/mA	正向电压 U_F/V	反向电流 I_R/mA	反向电压 U_R/V	发射功率 1 P/mW	发射功率 2 P/mW	发光峰值波长 λ_P/nm	半峰宽度 $\Delta\lambda/\text{nm}$	截止频率 f_T/MHz
HG301	75	50	≤ 1.5	≤ 50	≥ 5	1.0 ~ 3.0	5.0 ~ 10.0	940	≤ 40	≥ 1
HG302	75	50	≤ 1.5	≤ 50	≥ 5	3.0 ~ 5.0	10.0 ~ 15.0	940	≤ 40	≥ 1
HG306	75	50	≤ 1.5	≤ 50	≥ 5	> 5.0	> 15.0	940	≤ 40	≥ 1
HG311	50	35	≤ 1.5	≤ 50	≥ 5	1.0 ~ 3.0	5.0 ~ 10.0	940	≤ 40	≥ 1
HG312	50	35	≤ 1.5	≤ 50	≥ 5	3.0 ~ 5.0	10.0 ~ 15.0	940	≤ 40	≥ 1
HG313	50	35	≤ 1.5	≤ 50	≥ 5	> 5.0	> 15.0	940	≤ 40	≥ 1
HG411	100	50	≤ 1.5	≤ 50	≥ 5	1.0 ~ 1.5	2.0 ~ 4.0	940	≤ 40	≥ 1
HG412	100	50	≤ 1.5	≤ 50	≥ 5	1.0 ~ 3.0	4.0 ~ 6.0	940	≤ 40	≥ 1
HG413	100	50	≤ 1.5	≤ 50	≥ 5	> 3.0	> 6.0	940	≤ 40	≥ 1

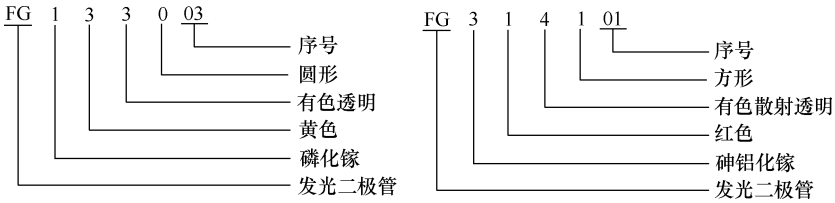
6.1.6 发光二极管的型号命名方法

- 国产发光二极管的型号命名分为 6 个部分。
 - 第一部分用字母 FG 表示发光二极管。
 - 第二部分用数字表示发光二极管材料。
 - 第三部分用数字表示发光二极管的发光颜色。
 - 第四部分用数字表示发光二极管的封装形式。
 - 第五部分用数字表示发光二极管的外形。
 - 第六部分用数字表示产品序号。
- 国产发光二极管的型号命名及含义见表 6-2。

表 6-2 国产发光二极管的型号命名及含义

第一部分： 主称		第二部分： 材料		第三部分： 发光颜色		第四部分： 封装形式		第五部分： 外形		第六部分： 产品序号
字母	含义	数字	含义	数字	含义	数字	含义	数字	含义	
FG	发光 二极管			0	红外			0	圆形	用数 字表 示产 品序 号
		1	磷化镓(GaP)	1	红色	1	无色透明	1	方形	
		2	磷砷化镓 (GaAsP)	2	橙色	2	无色散射	2	符号形	
		3	砷铝化镓 (GaAlAs)	3	黄色	3	有色透明	3	三角形	
				4	绿色	4	有色散	4	长方形	
				5	蓝色		射透明	5	组合形	
				6	变色			6	特殊形	
				7	紫蓝色					
				8	紫色					
				9	紫外或 白色					

例如：

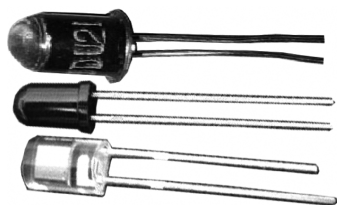


6.2 光敏二极管

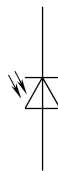
6.2.1 普通光敏二极管

1. 外形与符号

光敏二极管是一种光-电转换器件，能将光转换成电信号。图 6-15a 是一些常见的光敏二极管的实物外形，图 6-15b 为光敏二极管的电路符号。



a) 实物外形



b) 电路符号

图 6-15 光敏二极管

2. 性质

光敏二极管在电路中需要反向连接才能正常工作。下面以图 6-16 所示的电路来说明光敏二极管的性质。

在图 6-16 中，当无光线照射时，光敏二极管 VDL 不导通，无电流流过发光二极管 VL，VL 不亮。如果用光线照射 VDL，VDL 导通，电源输出的电流通过 VDL 流经发光二极管 VL，VL 亮，照射光敏二极管的光线越强，光敏二极管导通程度越深，自身的电阻变得越小，经它流到发光二极管的电流越大，发光二极管发出的光线越亮。

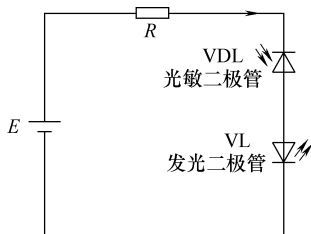


图 6-16 光敏二极管的性质说明

3. 主要参数

光敏二极管的主要参数有最高工作电压、光电流、暗电流、响应时间和光灵敏度等。

(1) 最高工作电压 最高工作电压是指无光线照射，光敏二极管反向电流不超过 $1\mu\text{A}$ 时所加的最高反向电压值。

(2) 光电流 光电流是指光敏二极管在受到一定的光线照射并加有一定的反向电压时的反向电流。对于光敏二极管来说，该值越大越好。

(3) 暗电流 暗电流是指光敏二极管无光线照射并加有一定的反向电压时的反向电流。该值越小越好。

(4) 响应时间 响应时间是指光敏二极管将光转换成电信号所需的时间。

(5) 光灵敏度 光灵敏度是指光敏二极管对光线的敏感程度。它是

指在接收到 $1\mu\text{W}$ 光线照射时产生的电流大小，光灵敏度的单位是 $\mu\text{A}/\text{W}$ 。

6.2.2 红外线接收二极管

1. 外形与图形符号

红外线接收二极管又称红外线光敏二极管，简称红外线接收管，能将红外光转换成电信号，为了减少可见光的干扰，常采用黑色树脂材料封装。红外线接收二极管的实物外形与电路符号如图 6-17 所示。



图 6-17 红外线接收二极管

2. 常见红外线接收二极管的主要参数

常见的红外线接收二极管的主要参数见表 6-3。

6.2.3 红外线接收组件

1. 外形

红外线接收组件简称红外线接收头，广泛用在各种具有遥控接收功能的电子产品中。常见的红外线接收头如图 6-18 所示。

2. 结构与原理

红外线接收头内部由红外线接收二极管和接收集成电路组成，接收集成电路内部主要有放大、选频及解调电路组成，红外线接收头内部结构如图 6-19 所示。

接收头内的红外线接收二极管将遥控器发射来的红外光转换成电信号，送入接收集成电路进行放大，然后经选频电路选出特定频率的信号，再由解调电路从该信号中取出遥控指令信号（由一系列二进制数 1、0 组成），从 OUT 端输出去微处理器或单片机。

表 6-3 常见的红外线接收二极管的主要参数

型号 \ 参数 符号	最高工作电压	暗电流	光电流	光灵敏度	峰值波长	上升时间	下降时间	结电容
	U_R/V	$I_D/\mu A$	$I_L/\mu A$	$S_r/(\mu A/\mu W)$	λ_p/nm	t_r/ns	t_f/ns	C_j/pF
2CU1A	10	≤ 0.2	≥ 80	≥ 0.5	880	≤ 5	≤ 50	≤ 8
2CU1B	20							
2CU1C	30							
2CU1D	40							
2CU1E	50							
2CU2A	10	≤ 0.1	≥ 30	≥ 0.5	880	≤ 5	≤ 50	≤ 8
2CU2B	20							
2CU2C	30							
2CU2D	40							
2CU2E	50							
试验条件	$I_R = I_D$	$U = U_{RM}$ 无光照	$U = U_{RM}$ 1000lx	$U = U_{RM}$ $\lambda = 0.9\mu m$		$R_L = 50\Omega$ $U = 10V$ $f = 300Hz$	$R_L = 50\Omega$ $U = 10V$ $f = 300Hz$	$U_{in} = 6mV$ $U = U_{RM}$ $f < 5MHz$

电子元器件选用轻松入门

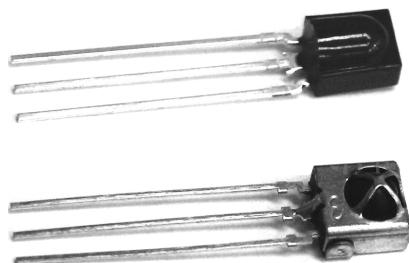


图 6-18 红外线接收头

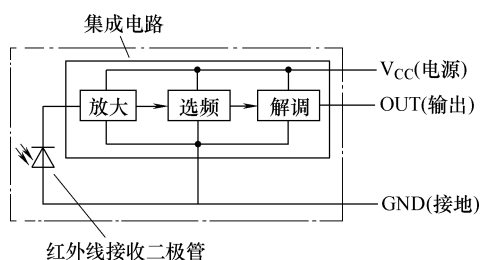


图 6-19 红外线接收头内部结构

6.3 光敏晶体管

6.3.1 外形与符号

光敏晶体管是一种对光线敏感且具有放大能力的晶体管。光敏晶体管大多只有两个引脚，少数有 3 个引脚。图 6-20a 是一些常见的光敏晶体管的实物外形，图 6-20b 为光敏晶体管的电路符号。

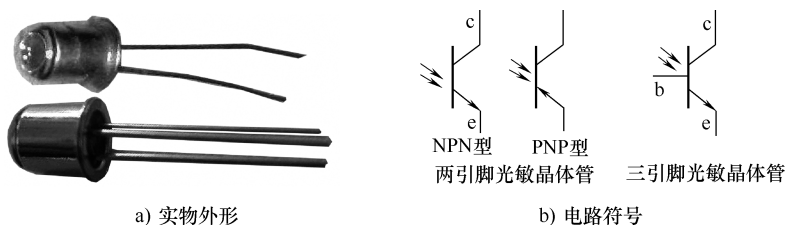


图 6-20 光敏晶体管

6.3.2 性质

光敏晶体管与光敏二极管区别在于，光敏晶体管除了具有光敏性外，还具有放大能力。两引脚的光敏晶体管的基极是一个受光面，没有引脚，三引脚的光敏晶体管基极既作受光面，又引出电极。下面通过图 6-21 所示的电路来说明光敏晶体管的性质。

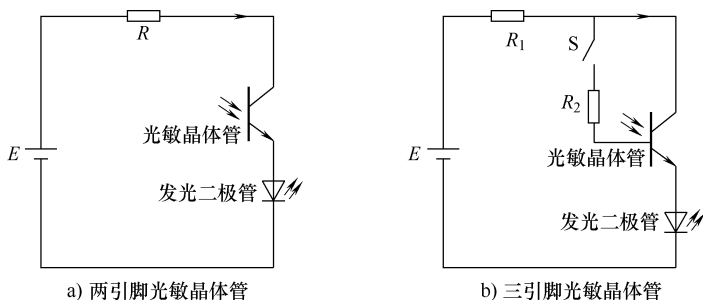


图 6-21 光敏晶体管的性质说明

在图 6-21a 中，两引脚光敏晶体管与发光二极管串接在一起。在无光照射时，光敏晶体管不导通，发光二极管不亮。当光线照光敏晶体管受光面（基极）时，受光面将入射光转换成 I_b 电流，该电流控制光敏晶体管 c、e 极之间导通，有 I_c 电流流过，光线越强， I_b 电流越大， I_c 越大，发光二极管越亮。

图 6-21b 中，三引脚光敏晶体管与发光二极管串接在一起。光敏晶体管 c、e 间导通可由 3 种方式控制：一是用光线照射受光面；二是给基极直接通入 I_b 电流；三是既通 I_b 电流又用光线照射。

由于光敏晶体管具有放大能力，比较适合用在光线微弱的环境中，它可将微弱光线产生的小电流进行放大，控制光敏晶体管导通效果比较明显，而光敏二极管对光线的敏感度较差，常用在光线较强的环境中。

6.3.3 光敏二极管和光敏晶体管的选用

在选用光敏二极管和光敏晶体管时，要注意以下事项：

1) 光敏二极管的光敏电流小，输出线性度好，响应时间短；光敏晶体管的光敏电流大，输出线性度差，响应时间慢。对于灵敏度要求高、工作频率低的开关电路，一般选用光敏晶体管，对于要求光敏电流

与照度成线性关系或要求工作频率高的，则应选用光敏二极管。

2) 光敏晶体管的负载电阻较小，约为光敏二极管负载电阻的 $1/10$ ，故在使用时，要分清光敏二极管还是光敏晶体管，并正确判断其好坏。

3) 光敏二极管或光敏晶体管并非只对红外光敏感，在使用时为防止环境光线过强而使放大电路输出饱和而失控，一般可加红色有机玻璃滤光，以减小环境光的影响。

6.4 光耦合器

6.4.1 外形与符号

光耦合器是将发光二极管和光敏晶体管组合在一起并封装起来构成的。图 6-22a 是一些常见的光耦合器的实物外形，图 6-22b 为光耦合器的电路符号。

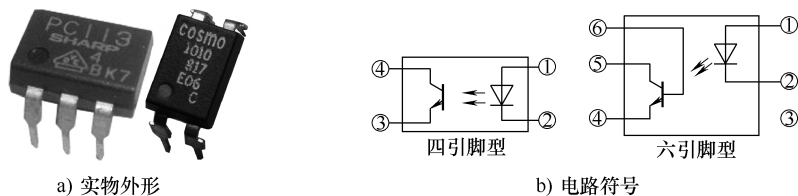


图 6-22 光耦合器

6.4.2 工作原理

光耦合器内部集成了发光二极管和光敏晶体管。下面以图 6-23 所示的电路来说明光耦合器的工作原理。

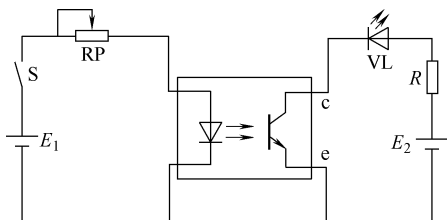


图 6-23 光耦合器工作原理说明

在图 6-23 中，当闭合开关 S 时，电源 E_1 经开关 S 和电位器 RP 为光耦合器内部的发光二极管提供电压，有电流流过发光二极管，发光管发出光线，光线照射到内部的光敏晶体管，光敏晶体管导通，电源 E_2 输出的电流经电阻 R、发光二极管 VL 流入光耦合器的 c 极，然后从 e 极流出回到 E_2 的负极，有电流流过发光二极管 VL，VL 发光。

调节电位器 RP 可以改变发光二极管 VL 的光线亮度。当 RP 滑动端右移时，其阻值变小，流入光耦合器内发光管的电流大，发光管光线强，光敏晶体管导通程度深，光敏晶体管 c、e 极之间电阻变小，电源 E_2 的回路总电阻变小，流经发光二极管 VL 的电流大，VL 变得更亮。

若断开开关 S，无电流流过光耦合器内的发光管，发光二极管不亮，光敏晶体管无光照射不能导通，电源 E_2 回路切断，发光二极管 VL 无电流通过而熄灭。

6.5 光遮断器

光遮断器又称光断续器、穿透型光电感应器，它与光耦合器一样，都是由发光二极管和光敏晶体管组成，但光电遮断器的发光二极管和光敏晶体管并没有封装成一体，而是相互独立。

6.5.1 外形与符号

光遮断器实物外形与电路符号如图 6-24 所示。

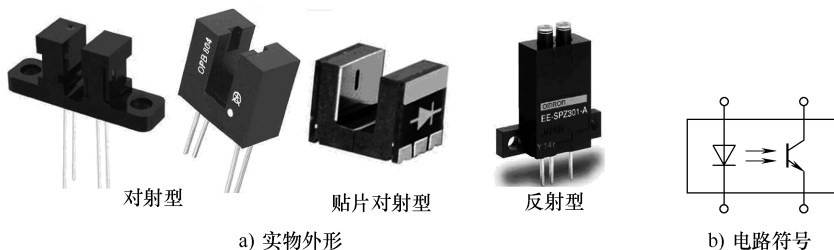


图 6-24 光遮断器

6.5.2 工作原理

光遮断器可分为对射型和反射型，下面以图 6-25 电路为例来说明

这两种光遮断器的工作原理。

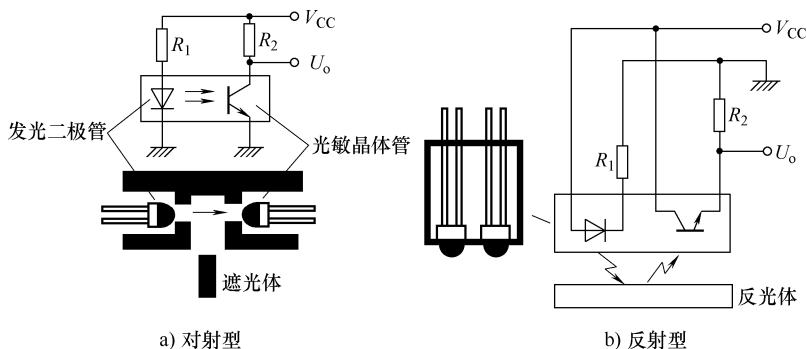


图 6-25 光遮断器工作原理说明图

图 6-25a 为对射型光遮断器的结构及应用电路。当电源通过 R_1 为发光二极管供电时，发光二极管发光，其光线通过小孔照射到光敏晶体管，光敏晶体管受光导通，输出电压 U_o 为低电平，如果用一个遮光体放在发光二极管和光敏晶体管之间，发光二极管的光线无法照射到光敏晶体管，光敏晶体管截止，输出电压 U_o 为高电平。

图 6-25b 为反射型光遮断器的结构及应用电路。当电源通过 R_1 为发光二极管供电时，发光二极管发光，其光线先照射到反光体上，再反射到光敏晶体管，光敏晶体管受光导通，输出电压 U_o 为高电平，如果无反光体存在，发光二极管的光线无法反射到光敏晶体管，光敏晶体管截止，输出电压 U_o 为低电平。

第 7 章

电 声 器 件

7.1 扬声器

7.1.1 外形与符号

扬声器俗称喇叭，是一种最常用的电-声转换器件，其功能将电信号转换成声音。扬声器实物外形和电路符号如图 7-1 所示。



图 7-1 扬声器

7.1.2 种类与工作原理

1. 种类

扬声器可按以下方式进行分类：

按换能方式可分为动圈式（即电动式）、电容式（即静电式）、电磁式（即舌簧式）和压电式（即晶体式）等。

按频率范围可分为低音扬声器、中音扬声器、高音扬声器。

按扬声器形状可分为纸盆式、号筒式和球顶式等。

2. 工作原理

扬声器的种类很多，工作原理大同小异，这里仅介绍应用最为广泛动圈式扬声器工作原理。动圈式扬声器的结构如图 7-2 所示。

从图 7-2 可以看出，动圈式扬声器主要由永久磁铁、线圈（或称为

音圈) 和与线圈做在一起的纸盆等构成。当电信号通过引出线流进线圈时, 线圈产生磁场, 由于流进线圈的电流是变化的, 故线圈产生的磁场也是变化的, 线圈变化的磁场与磁铁的磁场相互作用, 线圈和磁铁不断出现排斥和吸引, 重量轻的线圈产生运动 (时而远离磁铁, 时而靠近磁铁), 线圈的运动带动与它相连的纸盆振

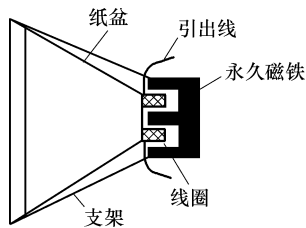


图 7-2 动圈式扬声器的结构

7.1.3 主要参数

1. 额定功率

额定功率又称标称功率, 是指扬声器在无明显失真的情况下, 能长时间正常工作时的输入电功率。扬声器实际能承受的最大功率要大于额定功率 (为 1~3 倍), 为了获得较好的音质, 应让扬声器实际输入功率小于额定功率。

2. 额定阻抗

额定阻抗又称标称阻抗, 是指扬声器工作在特定频率下所呈现的交流阻抗值。扬声器的额定阻抗有 4Ω 、 8Ω 、 16Ω 和 32Ω 等, 当扬声器与功放电路连接时, 扬声器的阻抗只有与功放电路的输出阻抗相等, 才能工作在最佳状态。

3. 频率特性

频率特性是指扬声器输出的声音大小随输入音频信号频率变化而变化的特性。不同频率特性的扬声器适合用在不同的电路, 例如低频特性好的扬声器在还原低音时声音大、效果好。

根据频率特性不同, 扬声器可分为高音扬声器 (几千到 20kHz)、中音扬声器 ($1\sim 3\text{kHz}$) 和低音扬声器 (几百到几十 Hz)。扬声器的频率特性与结构有关, 一般体积小的扬声器高频特性较好。

4. 灵敏度

灵敏度是指给扬声器输入规定大小和频率的电信号时, 在一定距离处扬声器产生的声压 (即声音大小)。在输入相同频率和大小的信号时, 灵敏度越高的扬声器发出的声音越大。

5. 指向性

指向性是指扬声器发声时在不同空间位置辐射的声压分布特性。扬声器的指向性越强，就意味着发出的声音越集中。扬声器的指向性与纸盆有关，纸盆越大，指向性越强，另外还与频率有关，频率越高，指向性越强。

7.1.4 选用

在选用扬声器时，要注意以下事项：

1) 扬声器的阻抗和功率要与所接的功率放大器的阻抗和功率相适应。扬声器的阻抗应与放大器的输出阻抗尽量相等，功率应大于放大器最大输出功率。多个扬声器串联或并联可提高或降低扬声器总阻抗，通过并联或串联可使小功率扬声器接大功率放大器。

2) 根据频率特性选择扬声器。要获得丰富的低音效果，尽量选用大口径或橡皮边扬声器，它增加了振动系统的柔顺性，提高了低频特性。在剧场、体育馆、大型会堂等场所，可选用专用的高频号筒式扬声器及倒相式音箱。扬声器振动系统所用材料和形状会直接影响音色，比如锥盆型和软球顶型扬声器能够表达出音乐的柔和，而硬球顶型扬声器能表达出音乐的力度。一般来说，大口径扬声器低频特性好，小口径扬声器高频特性好。

3) 选购扬声器。在选购时，查看扬声器铭牌标注的标称阻抗和额定功率是否符合要求，再检查扬声器引线、纸盆等有无破损，用两手均匀轻轻向下按动纸盆，倾听有无音圈与铁心摩擦的声音，在试听效果时，将扬声器与阻抗及功率符合要求的功放电路连接，播放熟悉的乐曲，性能好的扬声器发声应有层次、丰满、清晰、动听。

7.1.5 扬声器的型号命名方法

新型国产扬声器的型号命名由 4 部分组成。

第一部分用字母“Y”表示产品名称为扬声器。

第二部分用字母表示产品类型，“D”为电动式，“DG”为电动式高音，“HG”为号筒式高音。

第三部分用字母表示扬声器的重放频带，用数字表示扬声器口径（单位为 mm）。

第四部分用数字或数字与字母混合表示扬声器的生产序号。

新型国产扬声器的型号命名及含义见表 7-1。

表 7-1 新型国产扬声器的型号命名及含义

第一部分：主称		第二部分：类型		第三部分：重放频带或口径		第四部分：序号
字母	含义	字母	含义	数字或字母	含义	用数字或数字与字母混合表示扬声器的生产序号
Y	扬声器	D	电动式	D	低音	
				Z	中音	
				G	高音	
				QZ	球顶中音	
				QG	球顶高音	
				HG	号筒高音	
				130	130mm	
				140	140mm	
				166	166mm	
				176	176mm	
				200	200mm	
				206	206mm	

例如：YD 200—1A 是 200mm 电动式扬声器。其中，Y 代表扬声器；D 代表电动式；200 代表口径为 200mm；1A 代表序号。YD QG 1-6 是电动式球顶高音扬声器。其中，Y 代表扬声器；D 代表电动式；QG 代表球顶高音；1-6 代表序号。

7.2 耳机

7.2.1 外形与符号

耳机与扬声器一样，是一种电-声转换器件，其功能是将电信号转换成声音。耳机的实物外形和电路符号如图 7-3 所示。

7.2.2 种类与工作原理

耳机的种类很多，可分为动圈式、动铁式、压电式、静电式、气动式、等磁式和驻极体式 7 类，动圈式、动铁式和压电式耳机较为常见，



图 7-3 耳机

其中动圈式耳机使用最为广泛。

1. 动圈式耳机

这是一种最常用的耳机，其工作原理与动圈式扬声器相同，可以看作微型动圈式扬声器，其结构与工作原理可参见动圈式扬声器。动圈式耳机的优点是制作相对容易，且线性好、失真小、频响宽。

2. 动铁式耳机

动铁式耳机又称电磁式耳机，其结构如图 7-4 所示。一个铁片振动膜被永久磁铁吸引，在永久磁铁上绕有线圈，当线圈通入音频电流时会产生变化的磁场，它会增强或削弱永久磁铁的磁场，磁铁变化的磁场使铁片振动膜发生振动而发声。动铁式耳机优点是使用寿命长、效率高，缺点是失真大、频响窄，在早期较为常用。

3. 压电式耳机

压电式耳机利用压电陶瓷的压电效应发声，压电陶瓷的结构如图 7-5 所示。在铜片和涂银层之间夹有压电陶瓷片，当给铜片和涂银层之间施加变化的电压时，压电陶瓷片会发生振动而发声。压电式耳机效率高、频率高，其缺点是失真大、驱动电压高、低频响应差，抗冲击力差。这种耳机的使用远不及动圈式耳机广泛。

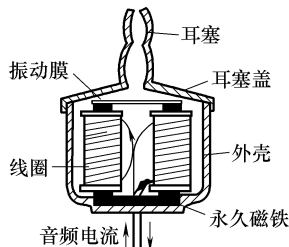


图 7-4 电磁式耳机的结构

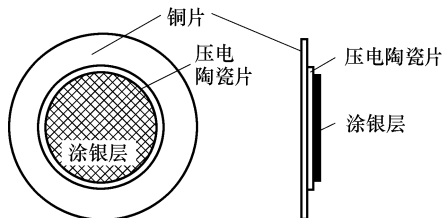


图 7-5 压电陶瓷的结构

7.2.3 选用

在选用耳机时，要注意以下事项：

1) 根据用途选用耳机。若主要用于收听语言广播，对音质要求不高，可选用灵敏度较高的耳机；若主要用于听音乐，要求耳机的音质好、频率响应范围宽（最好为 $20 \sim 20\text{kHz}$ ），同时要有一定的灵敏度。

2) 根据声道选用耳机。如果放音设备是单声道，可选用单声道耳机，如果放音设备是双声道，可选用立体声耳机，立体声耳机要求频率范围宽，左右两只耳机的频率响应、阻抗和灵敏度等参数应一致。

3) 通过连接放音设备选用耳机。选好耳机最好是连接放音设备，通过试听和比较来选择理想的耳机。

4) 根据使用场合选用耳机。若在环境噪声较大的场合使用，可选用抗噪声、抗干扰性好的带不通气耳罩的耳机，但长时间使用易使人耳疲劳；在家中使用时可选用带通气式耳罩的耳机，这类耳机声音柔和，但低音感不强。

7.3 蜂鸣器

蜂鸣器是一种一体化结构的电子讯响器，广泛应用于计算机、打印机、复印机、报警器、电子玩具、汽车电子设备、电话机、定时器等电子产品中作发声器件。

7.3.1 外形与符号

蜂鸣器实物外形和电路符号如图 7-6 所示，蜂鸣器在电路中用字母“H”或“HA”表示。



图 7-6 蜂鸣器



7.3.2 种类及结构原理

蜂鸣器主要有压电式蜂鸣器和电磁式蜂鸣器两种类型。

1. 压电式蜂鸣器

压电式蜂鸣器主要由多谐振荡器、压电蜂鸣片、阻抗匹配器及共鸣箱、外壳等组成。有的压电式蜂鸣器外壳上还装有发光二极管。多谐振荡器由晶体管或集成电路构成，当接通直流电源（1.5 ~ 15V），多谐振荡器起振，产生 1.5 ~ 2.5kHz 的音频信号，经阻抗匹配器推动压电蜂鸣片发声。压电蜂鸣片由锆钛酸铅或铌镁酸铅压电陶瓷材料制成，在陶瓷片的两面镀上银电极，经极化和老化处理后，再与黄铜片或不锈钢片粘在一起。

2. 电磁式蜂鸣器

电磁式蜂鸣器由振荡器、电磁线圈、磁铁、振动膜片及外壳等组成。接通电源后，振荡器产生的音频信号电流通过电磁线圈，使电磁线圈产生磁场。振动膜片在电磁线圈和磁铁的相互作用下，周期性地振动发声。

7.3.3 有源和无源蜂鸣器的区别

根据内部是否含有振荡器，蜂鸣器可分为无源蜂鸣器和有源蜂鸣器。

无源蜂鸣器结构与扬声器相似，内部不含振荡器，它通常采用电磁线圈来驱动振动膜片发声，由于内部不含振荡器，当提供直流电压时这种蜂鸣器无法工作，必须给它提供音频信号才能使之发声。有源蜂鸣器内部含有振荡器，发声部件可以采用压电结构，或是电磁结构，在工作时只要提供合适的直流电压，让振荡器工作产生音频信号就能使发声部件工作。

有源蜂鸣器和无源蜂鸣器的区别检测如下：

万用表拨至 $R \times 1$ 档，用黑表笔接蜂鸣器“+”引脚，红表笔间断碰触另一引脚，如果蜂鸣器会发出“咔嚓”声，并且电阻较小（通常为 8Ω 或 16Ω 左右）的为无源蜂鸣器；如果能发出持续声音且电阻在几百欧以上的是有源蜂鸣器。

有些有源蜂鸣器的工作电源较高，万用表 $R \times 1$ 档提供的直流电压

可能无法使内部振荡器工作，这种情况下蜂鸣器不发声，这时可给蜂鸣器两个引脚直接接上额定电源（蜂鸣器的标签上通常标有），有源蜂鸣器就会连续发声，而无源蜂鸣器则和电磁扬声器一样，需要直接加音频信号才能发声。

7.3.4 选用

在选用蜂鸣器时，要注意以下事项：

1) 压电式蜂鸣器的音调单一且音色差，适用于报警器、门铃、定时器、儿童玩具、电子钟等的音响器。电磁式蜂鸣器音色好，所以多用于语音、音乐等设备，适用于计算机、复印机、打印机等设备的音响器。

2) 压电式蜂鸣器内置多谐振荡器，只要为其接通合适的直流工作电压，即可振荡发声。电磁式蜂鸣器可分为自带音源和不带音源两种类型，自带音源的蜂鸣器内置集成电路，不需要外加任何音频驱动电路，只要提供合适的直流电压即可发声。

3) 根据工作电压不同，蜂鸣器可分为1V、5V、3V、6V、9V、12V等规格，可根据应用电路的实际电压选用。

7.4 传声器

7.4.1 外形与符号

传声器俗称麦克风、话筒，是一种声-电转换器件，其功能是将声音转换成电信号。传声器实物外形和电路符号如图7-7所示。



图 7-7 传声器

7.4.2 工作原理

传声器的种类很多，下面介绍最常用的动圈式传声器和驻极体式传声器的工作原理。

1. 动圈式传声器工作原理

动圈式传声器的结构如图 7-8 所示，它主要由振动膜、线圈和永久磁铁组成。

当声音传递到振动膜时，振动膜产生振动，与振动膜连在一起的线圈会随振动膜一起运动，由于线圈处于磁铁的磁场中，当线圈在磁场中运动时，线圈会切割磁铁的磁感应线而产生与运动相对应的电信号，该电信号从引出线输出，从而实现声-电转换。

2. 驻极体式传声器工作原理

驻极体式传声器具有体积小、性能好，并且价格便宜，广泛用在一些小型具有录音功能的电子设备中。驻极体式传声器的结构如图 7-9 所示。

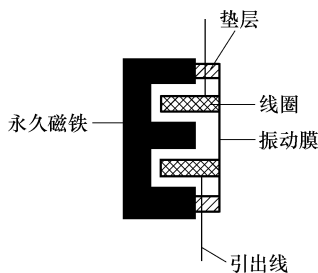


图 7-8 动圈式传声器的结构

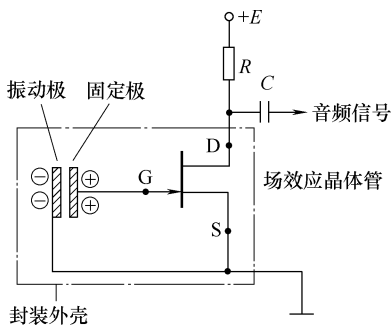


图 7-9 驻极体式传声器的结构

点画线框内的为驻极体式传声器，它由振动极、固定极和一个场效应晶体管构成。振动极与固定极形成一个电容，由于两电极是经过特殊处理的，所以它本身具有静电场（即两电极上有电荷），当声音传递到振动极时，振动极发生振动。振动极与固定极距离发生变化，引起容量发生变化，容量的变化导致固定电极上的电荷向场效应晶体管栅极 G 移动，移动的电荷就形成电信号，电信号经场效应晶体管放大后从 D 极输出，从而完成了声-电转换过程。

7.4.3 主要参数

1. 灵敏度

灵敏度是指传声器在一定的声压下能产生音频信号电压的大小。灵敏度越高，在相同大小的声音下输出的音频信号幅度越大。

2. 频率特性

频率特性是指传声器的灵敏度随频率变化而变化的特性。如果传声器的高频特性好，那么还原出来的高频信号幅度大且失真小。大多数传声器频率特性较好的范围为 $100\text{Hz} \sim 10\text{kHz}$ ，优质传声器频率特性范围可达到 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 。

3. 输出阻抗

输出阻抗是指传声器在 1kHz 的情况下输出端的交流阻抗。低阻抗传声器输出阻抗一般在 $2\text{k}\Omega$ 以下，输出阻抗在 $2\text{k}\Omega$ 以上的传声器称为高阻抗传声器。

4. 固有噪声

固有噪声是指在没有外界声音时传声器输出的噪声信号电压。传声器的固有噪声越大，工作时输出信号中混有的噪声越多。

5. 指向性

指向性是指传声器灵敏度随声波入射方向变化而变化的特性。传声器的指向性有单向性、双向性和全向性3种。

单向性传声器对正面方向的声音灵敏度高于其他方向的声音。双向性传声器对正、背面方向的灵敏度高于其他方向的声音。全向性传声器对所有方向的声音灵敏度都高。

7.4.4 种类

传声器种类很多，常见的有动圈式传声器、驻极体式传声器、铝带式传声器、电容式传声器、压电式传声器和炭粒式传声器等。常见传声器特点见表7-2。

表 7-2 常见传声器的特点

种 类	特 点
动圈式传声器	动圈式传声器又称为电动式传声器，其优点是结构合理耐用、噪声低、工作稳定、经济实用且性能好
驻极体式传声器	驻极体式传声器重量轻、体积小、价格低、结构简单、电声性能好，但音质较差、噪声较大
铝带式传声器	铝带式传声器音质真实自然，高、低频音域宽广，过渡平滑自然，瞬间响应快速精确，但价格较贵
电容式传声器	电容式传声器是一种电声特性非常好的传声器，其频率范围宽、灵敏度高、非线性失真小、瞬态响应好，缺点是防潮性差、机械强度低、价格较贵、使用时需提供高压
压电式传声器	压电式传声器又称晶体式传声器，其灵敏度高、结构简单、价格便宜，但频率特性不够宽
炭粒式传声器	炭粒式传声器结构简单、价格便宜、灵敏高、输出功率大，但频率特性差、噪声大、失真也很大

7.4.5 选用

在选用传声器时，要注意以下事项：

- 1) 在室内进行语言录音时，一般选用动圈式传声器，因为语言的频带较窄，使用动圈式传声器可避免产生不必要的杂音。在进行音乐录音时，一般要选择性能好的电容式传声器，以满足宽频带、大动态、高保真的需要。录制频率较低的乐器演奏时可用动圈式传声器。在小型会场及人数不太多的会议室，可选用灵敏度一般的动圈式传声器，灵敏度较高的传声器易产生反馈啸叫。广播室播音可选用动圈式传声器。录音机、电话机和手机中可选用驻极体式传声器。
- 2) 进行 1m 以上远距离录音时，应尽量选用灵敏度高的传声器。若环境噪声大，可选用单指向传声器，以增加选择性。
- 3) 在使用传声器时，除近讲传声器外，普通传声器要注意与声源保持 0.3m 左右的距离，以防失真。在运动中录音时，要使用无线传声器，使用无线传声器时要注意防止干扰和“死区”，碰到这种情况时，可通过改变传声器无线电频率和调整收、发天线来解决。

4) 根据扩音设备的输入阻抗选用传声器。不同的扩音设备的传声器插口的输入阻抗不相同,应尽量让传声器的输出阻抗与扩音设备的传声器插口输入阻抗相同,才能保证最佳传声和扩声效果。

7.4.6 电声器件的型号命名方法

国产电声器件的型号命名由4部分组成。

第一部分用汉语拼音字母表示产品的主称。

第二部分用字母表示产品类型。

第三部分用字母或数字表示产品特征(包括辐射形式、形状、结构、功率、等级、用途等)。

第四部分用数字表示产品序号(部分扬声器表示口径和序号)。

国产电声器件型号命名及含义见表7-3。

例如:CD II-1 是2级动圈式传声器。其中,C代表传声器;D代表动圈式;II代表2极;1代表序号。EDL-3 是立体声动圈式耳机。其中,E代表耳机;D代表动圈式;L代表立体声;3代表序号。YD 10-12B 是10W 电动式扬声器。其中,Y代表扬声器;D代表电动式;10代表功率为10W;12B代表序号。YD 3-1655 是3W 电动式扬声器。其中,Y代表扬声器;D代表电动式;3代表功率为3W;1655代表口径为165mm。

表 7-3 国产电声器件型号命名及含义

第一部分:主称		第二部分:类型		第三部分:特征				第四部分: 序号
字母	含义	字母	含义	字母	含义	数字	含义	用数字表示 产品序号
Y	扬声器	C	电磁式	C	手持式;测试用	I	1 级	
C	传声器	D	电动式 (动圈式)	D	头戴式;低频	II	2 级	
E	耳机			F	飞行用	III	3 级	
O	送话器	A	带式	G	耳挂式;高频	025	0.25 W	
H	两用换能器	E	平膜音圈式	H	号筒式	04	0.4 W	
S	受话器	Y	压电式	I	气导式	05	0.5 W	
N、OS	送话器组	R	电容式、静电式	J	舰艇用;接触式	1	1 W	
EC	耳机传声器组			K	抗噪式	2	2 W	
HZ	号筒式组合扬声器	T	碳粒式	L	立体声	3	3 W	
		Q	气流式	P	炮兵用	5	5 W	
YX	扬声器箱	Z	驻极体式	Q	球顶式	10	10 W	
YZ	声柱扬声器	J	接触式	T	椭圆形	15	15 W	
						20	20 W	

电子元器件选用轻松入门



第 8 章

显示器件

显示器件是一种将电信号转换成能看得见的字符图形的器件。显示器件种类很多，本章主要介绍了 LED 数码管、LED 点阵显示器、真空荧光显示器和液晶显示屏。

LED 数码管是将发光二极管做成段状，通过让不同段发光来组合成各种数字；LED 点阵显示器是将发光二极管做成点状，通过让不同点发光来组合成各种字符图形；真空荧光显示器是将有关电极做成各种形状并涂上荧光粉，通过让灯丝发射电子轰击不同电极上的荧光粉来显示字符图形；液晶显示屏是通过施加电压使特定区域的液晶变得透明或不透明来显示字符图形。

8.1 LED 数码管与 LED 点阵显示器

8.1.1 1 位 LED 数码管

1. 外形、结构与工作原理

1 位 LED 数码管如图 8-1 所示，它将 a、b、c、d、e、f、g、dp 共 8 个发光二极管排成图示的“.”字形，通过让 a、b、c、d、e、f、g 不同的段发光来显示数字 0~9。

由于 8 个发光二极管共有 16 个引脚，为了减少数码管的引脚数，在数码管内部将 8 个发光二极管正极或负极引脚连接起来，接成一个公共端（COM 端），根据公共端是发光二极管正极还是负极，可分为共阳极接法（正极相连）和共阴极接法（负极相连），如图 8-2 所示。

对于共阳极接法的数码管，需要给发光二极管加低电平才能发光；而对于共阴极接法的数码管，需要给发光二极管加高电平才能发光。假设图 8-1 是一个共阴极接法的数码管，如果让它显示一个“5”字，那么需要给 a、c、d、f、g 引脚加高电平（即这些引脚为 1），b、e 引脚加

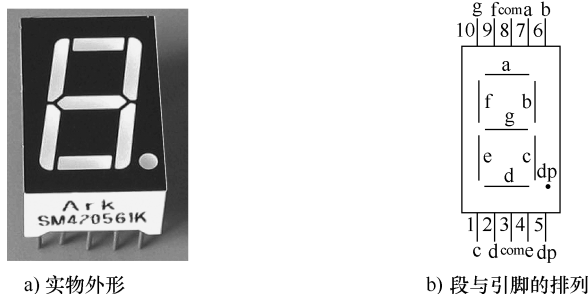


图 8-1 1 位 LED 数码管

低电平（即这些引脚为 0），这样 a、c、d、f、g 段的发光二极管有电流通过而发光，b、e 段的发光二极管不发光，数码管就会显示出数字“5”。

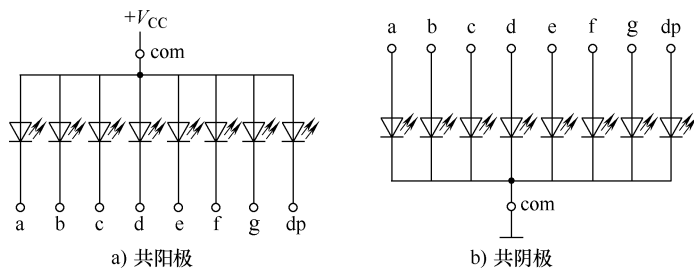


图 8-2 1 位 LED 数码管内部发光二极管的连接方式

2. 选用

在选用 LED 数码管时，要注意以下事项：

1) 根据驱动电路的类型来确定 LED 数码管的类型（共阳或共阴），各段的引脚排列是否与电路一致。

2) LED 数码管每段的工作电流为 5 ~ 10mA（最大不允许超过 20mA），如有必要，可在驱动电路与各段间加适当阻值的限流电阻。

3) 在装配 LED 数码管时，烙铁温度不宜太高，焊接时间控制在 10s 以内，可以用镊子夹住引脚焊接帮助散热，避免损坏数码管内部的极。

8.1.2 多位 LED 数码管

1. 外形与类型

图8-3是4位LED数码管，它有两排共12个引脚，其内部发光二极管有共阳极和共阴极两种连接方式，如图8-4所示，12、9、8、6脚分别为各位数码管的公共极，11、7、4、2、1、10、5、3脚同时接各位数码管的相应段，称为段极。

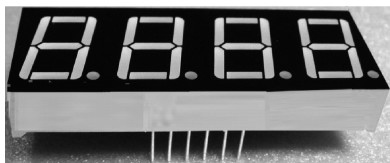


图8-3 4位LED数码管

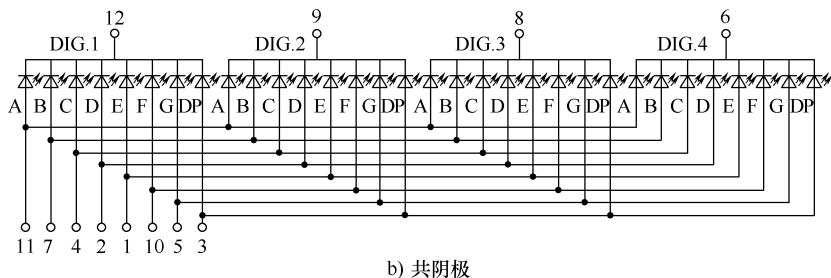
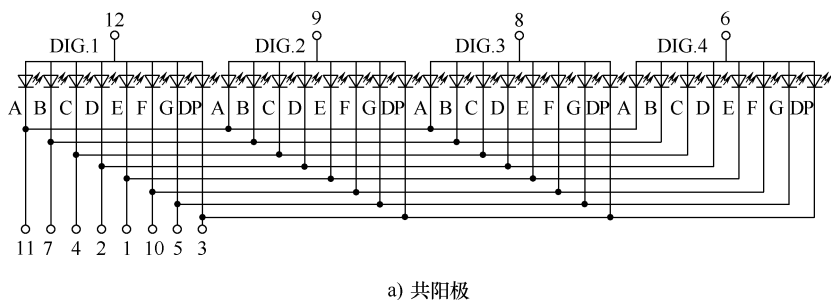


图8-4 4位LED数码管内部发光二极管的连接方式

2. 显示原理

多位LED数码管采用了扫描显示方式，又称动态驱动方式。为了

让大家理解该显示原理，这里以在图 8-3 所示的 4 位 LED 数码管上显示“1278”为例来说明，假设其内部发光二极管为图 8-4b 所示的连接方式。

先给数码管的 12 脚加一个低电平（9、8、6 脚为高电平），再给 7、4 脚加高电平（11、2、1、10、5 脚均低电平），结果第一位的 B、C 段发光二极管点亮，第一位显示“1”，由于 9、8、6 脚均为高电平，故第二、三、四位中的所有发光二极管均无法导通而不显示；然后给 9 脚加一个低电平（12、8、6 脚为高电平），给 11、7、2、1、5 脚加高电平（4、10 脚为低电平），第二位的 A、B、D、E、G 段发光二极管点亮，第二位显示“2”，同样原理，在第三位和第四位分别显示数字“7”、“8”。

多位数码管的数字虽然是一位一位地显示出来的，但人眼具有视觉暂留特性（所谓视觉暂留特性是指当人眼看见一个物体后，如果物体消失，人眼还会觉得物体仍在原位置，这种感觉约保留 0.04s 的时间），当数码管显示到最后一位数字“8”时，人眼会感觉前面 3 位数字还在显示，故看起来好像是一下子显示“1278”4 位数。

3. 应用

图 8-5 是一个 4 位 LED 数码管显示电路。ATmega8 为 8 位 AVR 单片机，它除了从 PC1 ~ PC4 引脚输出位扫描信号外，还分别从 MOSI、

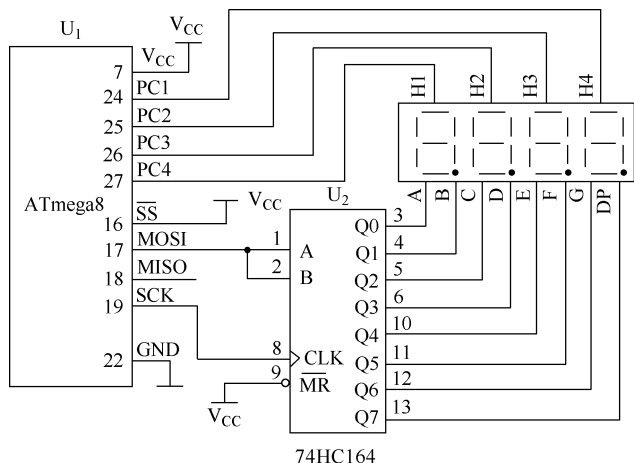


图 8-5 一个 4 位 LED 数码管显示电路

SCK 引脚输出时钟信号和串行数据，74HC164 为串入并出芯片，它在 CLK 引脚输入的时钟信号控制下，将 A、B 引脚输入的串行数据转换成并行数据，即数据从 A、B 引脚一位一位输入 74HC164，经转换后从 Q0 ~ Q7 端同时输出 8 位数据，送到 4 位 LED 数码管的 A ~ G、DP 端，数码管以扫描方式显示 4 位数。

单片机输出的位扫描信号和串行显示数据由编写的程序来决定。

8.1.3 LED 点阵显示器

1. 外形与结构

图 8-6a 为 LED 点阵显示器的实物外形，图 8-6b 为 8×8 LED 点阵显示器内部结构，它是由 $8 \times 8 = 64$ 个发光二极管组成，每个发光管相当于一个点，发光管为单色发光二极管可构成单色点阵显示器，发光管为双色发光二极管或三原色发光二极管则能构成彩色点阵显示器。

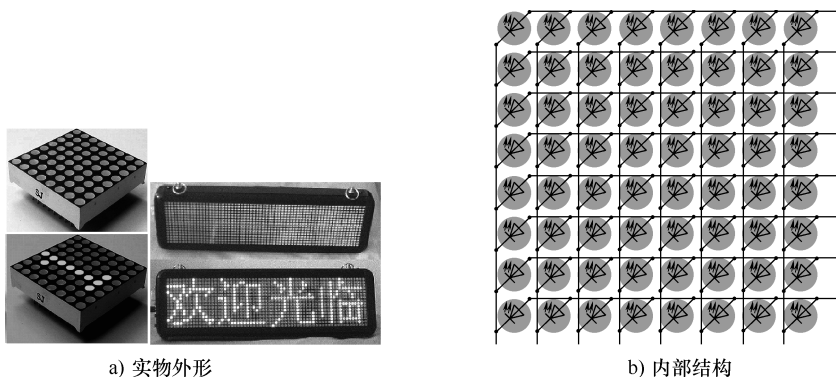


图 8-6 LED 点阵显示器

2. 类型与工作原理

(1) 类型 根据内部发光二极管连接方式不同，LED 点阵显示器可分为共阴型和共阳型，其结构如图 8-7 所示，对单色 LED 点阵来说，若第一个引脚（引脚旁通常标有 1）接发光二极管的阴极，该点阵叫做共阴型点阵（又称行共阴列共阳点阵），反之则叫共阳点阵（又称行共阳列共阴点阵）。

(2) 工作原理 下面以在图 8-8 所示的 5×5 点阵中显示“△”图形为例进行说明。

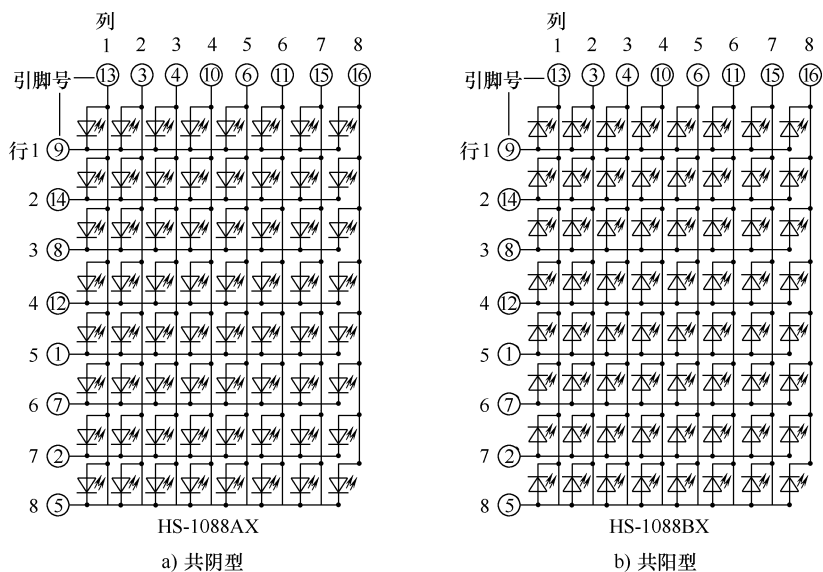


图 8-7 单色 LED 点阵的结构类型

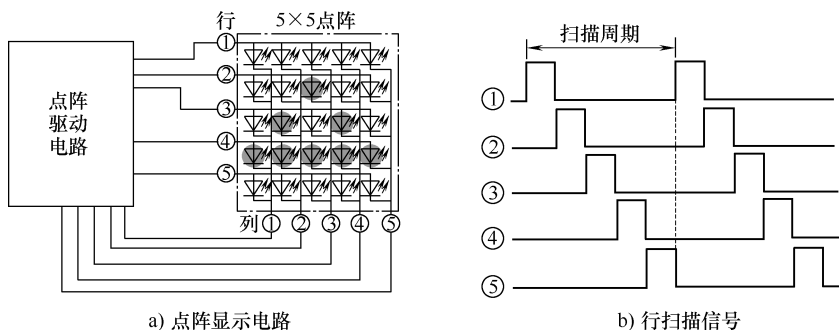


图 8-8 点阵显示原理说明

点阵显示采用扫描显示方式，具体又可分为 3 种方式：行扫描、列扫描和点扫描。

1) 行扫描方式。在显示前让点阵所有行线为低电平（0）、所有列线为高电平（1），点阵中的发光二极管均截止，不发光。在显示时，首先让行①线为 1，如图 8-10b 所示，列①~⑤线为 11111，第一行 LED 都不亮，然后让行②线为 1，列①~⑤线为 11011，第二行中的第 3 个

LED 亮,再让行③线为 1,列①~⑤线为 10101,第 3 行中的第 2、4 个 LED 亮,接着让行④线为 1,列①~⑤线为 00000,第 4 行中的所有 LED 都亮,最后让行⑤线为 1,列①~⑤为 11111,第 5 行中的所有 LED 都不亮。第 5 行显示后,由于人眼的视觉暂留特性,会觉得前面几行的 LED 还在亮,整个点阵显示一个“△”图形。

当点阵工作在行扫描方式时,为了让显示的图形有整体连续感,要求从第一行扫到最后一行的时间不应超过 0.04s (人眼视觉暂留时间),即行扫描信号的周期不要超过 0.04s,频率不要低于 25Hz,若行扫描信号周期为 0.04s,则每行的扫描时间为 0.008s,即每列数据持续时间为 0.008s,列数据切换频率为 125Hz。

2) 列扫描方式。列扫描与行扫描的工作原理大致相同,不同在于列扫描是从列线输入扫描信号,并且列扫描信号为低电平有效,而行线输入行数据。以图 8-8a 所示电路为例,在列扫描时,首先让列①线为低电平(0),从行①~⑤线输入 00010,然后让列②线为 0,从行①~⑤线输入 00110。

3) 点扫描方式。点扫描方式的工作过程是:首先让行①线为高电平,让列①~⑤线逐线依次输出 1、1、1、1、1,然后让行②线为高电平,让列①~⑤线逐线依次输出 1、1、0、1、1,再让行③线为高电平,让列①~⑤线逐线依次输出 1、0、1、0、1,接着让行④线为高电平,让列①~⑤线逐线依次输出 0、0、0、0、0,最后让行⑤线为高电平,让列①~⑤线逐线依次输出 1、1、1、1、1,结果在点阵上显示出“△”图形。

从上述分析可知,点扫描是从前往后让点阵中的每个 LED 逐个显示,由于是逐点输送数据,这样就要求列数据的切换频率很高,以 5×5 点阵为例,如果整个点阵的扫描周期为 0.04s,那么每个 LED 显示时间为 $0.04/25 = 0.0016\text{s}$,即 1.6ms,列数据切换频率达 625Hz。对于 128×128 点阵,若采用点扫描方式显示,其数据切换频率更达 409600Hz,每个 LED 通电时间约为 $2\mu\text{s}$,这不但要求点阵驱动电路很高的数据处理速度,另外,由于每个 LED 通电时间很短,会造成整个点阵显示的图形偏暗,故像素很多的点阵很少采用点扫描方式。

3. 应用

图 8-9 是一个单片机驱动的 8×8 点阵电路。 U_1 为 8×8 共阳型 LED

点阵，其列引脚旁的小圆圈表示低电平输入有效，不显示时这些引脚为高电平，需要点阵某列显示时可让对应列引脚为低电平， U_2 为 AT89S51 型单片机， S 、 C_1 、 R_2 构成单片机的复位电路， Y_1 、 C_2 、 C_3 为单片机的振荡电路外接定时元件， R_1 为 $1k\Omega$ 的排阻，1 脚与 2~9 脚之间分别接有 8 个 $1k\Omega$ 的电阻。如果希望在点阵上显示字符或图形，可先在电脑中用编程软件编写相应的程序，然后通过编程器将程序写入单片机 AT89S51，再将单片机安装在图 8-9 所示的电路中，它就能输出扫描信号和显示数据，驱动点阵显示相应的字符或图形，该点阵的扫描方式由编写的程序确定，具体可参阅有关单片机方面的书籍。

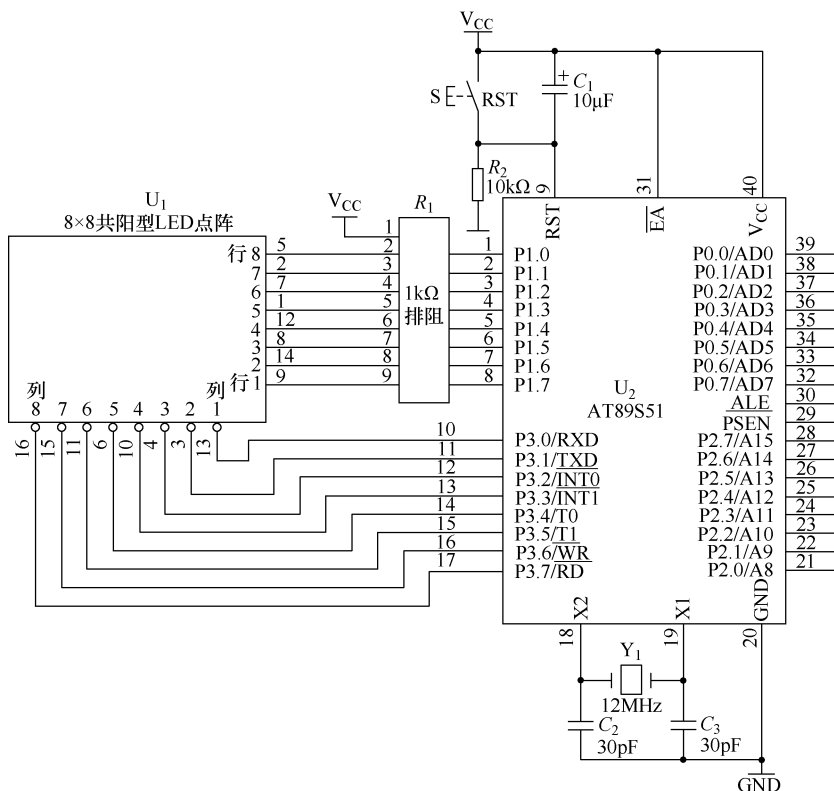


图 8-9 一个单片机驱动的 8×8 点阵电路

8.2 真空荧光显示器

真空荧光显示器简称 VFD，是一种真空显示器件，常用在一些家用电器中（如影碟机、录像机和音响设备）、办公自动化设备、工业仪器仪表及汽车等各种领域中，用来显示机器的状态和时间等信息。

8.2.1 外形

真空荧光显示器如图 8-10 所示。



图 8-10 真空荧光显示器

8.2.2 结构与工作原理

真空荧光显示器有 1 位荧光显示器和多位荧光显示器。

1. 1 位真空荧光显示器

图 8-11 为 1 位数字显示荧光显示器的结构示意图，它内部有灯丝、栅极（门极）和 a、b、c、d、e、f、g 7 个阳极，这 7 个阳极上都涂有荧光粉并排列成“8”字样，灯丝的作用是发射电子，栅极（金属网格状）处于灯丝和阳极之间，灯丝发射出来的电子能否到达阳极受栅极的控制，阳极上涂有荧光粉，当电子轰击荧光粉时，阳极上的荧光粉发光。

在真空荧光显示器工作时，要给灯丝提供 3V 左右的交流电压，灯丝发热后才能发射电子，栅极加上较高的电压才能吸引电子，让它穿过栅极并往阳极方向运动。电子要轰击某个阳极，该阳极必须有高电压。

当要显示“3”字样时，由驱动电路给真空荧光显示器的 a、b、c、d、e、f、g 7 个阳极分别送 1、1、1、1、0、0、1，即给 a、b、c、d、g 5 个阳极送高电压，另外给栅极也加上高电压，于是灯丝发射的电子穿网格状的栅极后轰击加有高电压的 a、b、c、d、g 阳极，由于这些阳极上涂有荧光粉，在电子的轰击下，这些阳极发光，显示器显示“3”的字样。

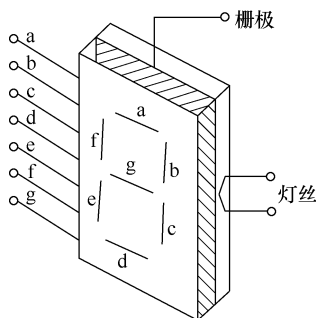


图 8-11 1 位真空荧光显示器的结构示意图

2. 多位真空荧光显示器

一个真空荧光显示器能显示一位数字，若需要同时显示多位数字或字符，可使用多位真空荧光显示器。图 8-12a 为 4 位真空荧光显示器的结构示意图。

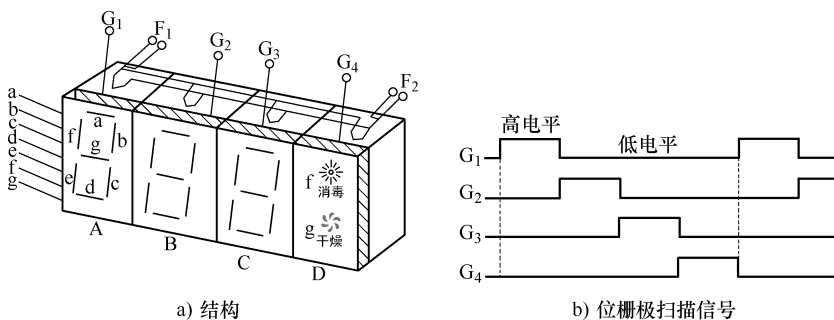


图 8-12 4 位真空荧光显示器的结构及扫描信号

图 8-12 中的真空荧光显示器有 A、B、C、D 4 个位区，每个位区都有单独的栅极，4 个位区的栅极引出脚分别为 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 ；每个位

区的灯丝在内部以并联的形式连接起来，对外只引出两个引脚；A、B、C 位区数字的相应各段的阳极都连接在一起，再与外面的引脚相连，例如 C 位区的阳极段 a 与 B、A 位区的阳极段 a 都连接起来，再与显示器引脚 a 连接，D 位区两个阳极为图形和文字形状，消毒图形与文字为一个阳极，与引脚 f 连接，干燥图形与文字为一个阳极，与引脚 g 连接。

多位真空荧光显示器与多位 LED 数码管一样，都采用扫描显示原理。下面以在图 8-12 所示的显示器上显示“127 消毒”为例来说明。

首先给灯丝引脚 F_1 、 F_2 通电，再给 G_1 引脚加一个高电平，此时 G_2 、 G_3 、 G_4 均为低电平，然后分别给 b、c 引脚加高电平，灯丝通电发热后发射电子，电子穿过 G_1 栅极轰击 A 位阳极 b、c，这两个电极的荧光粉发光，在 A 位显示“1”字样，这时虽然 b、c 引脚的电压也会加到 B、C 位的阳极 b、c 上，但因为 B、C 位的栅极为低电平，B、C 位的灯丝发射的电子无法穿过 B、C 位的栅极轰击阳极，故 B、C 位无显示；接着给 G_2 脚加高电平，此时 G_1 、 G_3 、 G_4 引脚均为低电平，再给阳极 a、b、d、e、g 加高电平，灯丝发射的电子轰击 B 位阳极 a、b、d、e、g，这些阳极发光，在 B 位显示“2”字样。同样原理，在 C 位和 D 位分别显示“7”、“消毒”字样， G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 极的电压变化关系如图 8-12b 所示。

显示器的数字虽然是一位一位地显示出来的，但由于人眼视觉暂留特性，当显示器显示最后“消毒”字样时，人眼仍会感觉前面 3 位数字还在显示，故看起来好像是一下子显示“127 消毒”。

8.3 液晶显示屏

液晶显示屏简称 LCD 屏，其主要材料是液晶。液晶是一种有机材料，在特定的温度范围内，既有液体的流动性，又有某些光学特性，其透明度和颜色随电场、磁场、光及温度等外界条件的变化而变化。液晶显示屏是一种被动式显示器件，液晶本身不会发光，它是通过反射或透射外部光线来显示，光线越强，其显示效果越好。液晶显示屏是利用液晶在电场作用下光学性能变化的特性制成的。

液晶显示屏可分为笔段式显示屏和点阵式显示屏。

8.3.1 笔段式液晶显示屏

1. 外形

笔段式液晶显示屏如图 8-13 所示。

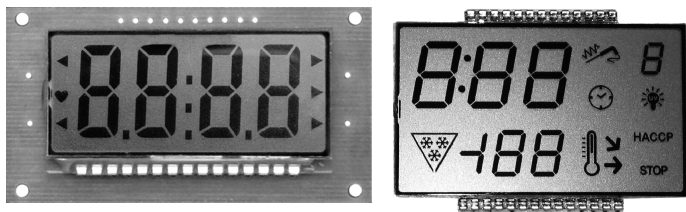


图 8-13 笔段式液晶显示屏

2. 结构与工作原理

图 8-14 是 1 位笔段式液晶显示屏的结构。

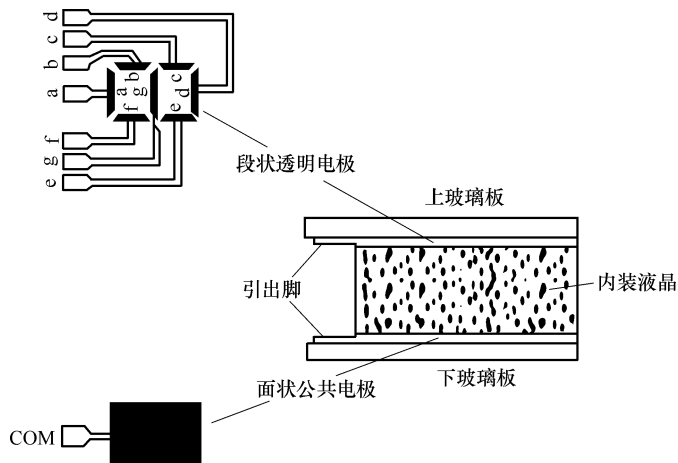


图 8-14 1 位笔段式液晶显示屏的结构

1 位笔段式液晶显示屏是将液晶材料封装在两块玻璃之间，在上玻璃内表面涂上“”字形的 7 段透明电极，在下玻璃内表面整个涂上导电层作公共电极（或称背电极）。

当给液晶显示屏上玻璃板的某段透明电极与下玻璃的公共电极之间加上适当大小的电压时，该段极与下玻璃上的公共电极之间夹持的液晶

会产生“散射效应”，夹持的液晶不透明，就会显示出该段形状。例如给下玻璃上的公共电极加一个低电压，而给上玻璃板内表面的 a、b 段透明电极加高电压，a、b 段极与下玻璃上的公共电极存在电压差，它们中间夹持的液晶特性改变，a、b 段下面的液晶变得不透明，呈现出“1”字样。

如果在上玻璃板内表面涂上某种形状的透明电极，只要给该电极与下面的公共电极之间加一定的电压，液晶屏就能显示该形状。笔段式液晶显示屏上玻璃板内表面可以涂上各种形状的透明电极，如图 8-13 所示横、竖、点状和雪花状，由于这些形状的电极是透明的，且液晶未加电压时也是透明的，故未加电时显示屏无任何显示，只要给这些电极与公共极之间加电压，就可以将这些形状显示出来。

3. 多位笔段式 LCD 屏的驱动方式

多位笔段式液晶显示屏有静态和动态（扫描）两种驱动方式。在采用静态驱动方式时，整个显示屏使用一个公共背电极并接出一个引脚，而各段电极都需要独立接出引脚，如图 8-15 所示，故静态驱动方式的显示屏引脚数量较多。在采用动态驱动（即扫描方式）时，各位都要有独立的背电极，各位相应的段电极在内部连接在一起再接出一个引脚，动态驱动方式的显示屏引脚数量较少。

动态驱动方式的多位笔段式液晶显示屏的工作原理与多位 LED 数码管、多位真空荧光显示器一样，采用逐位快速显示的扫描方式，利用人眼的视觉暂留特性来产生屏幕整体显示的效果。如果要将图 8-15 所示的静态驱动显示屏改成动态驱动显示屏，只需将整个公共背电极切分成 5 个独立的背电极，并引出 5 个引脚，然后将 5 个位中相同的段极在内部连接起来并接出 1 个引脚，共接出 8 个引脚，这样整个显示屏只需 13 个引脚。在工作时，先给第 1 位背电极加电压，同时给各段极传送相应电压，显示屏第 1 位会显示出需要的数字，然后给第 2 位背电极加电压，同时给各段极传送相应电压，显示屏第 2 位会显示出需要的数字，如此工作，直至第 5 位显示出需要的数字，然后重新从第 1 位开始显示。

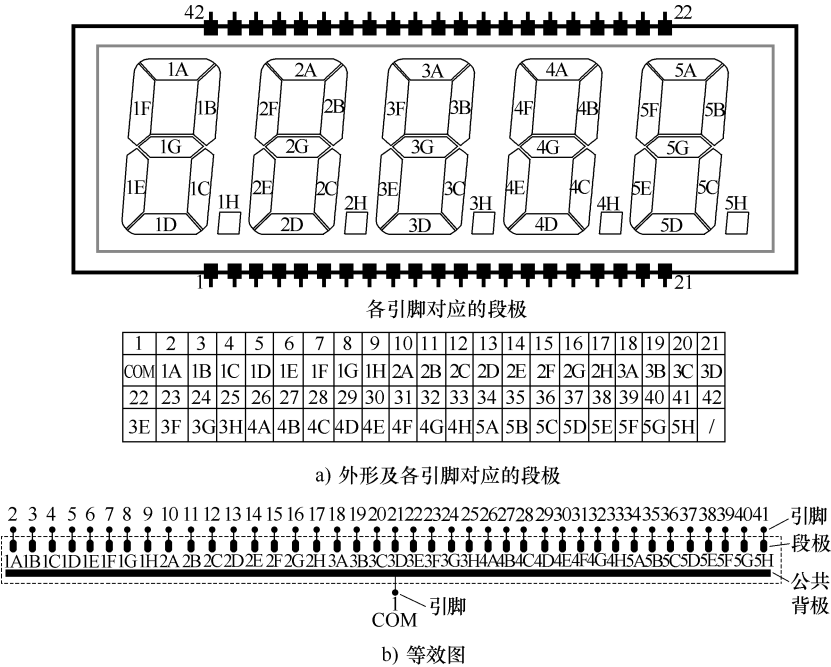


图 8-15 静态驱动方式的多位笔段式液晶显示屏

8.3.2 点阵式液晶显示屏

1. 外形

笔段式液晶显示屏结构简单，价格低廉，但显示的内容简单且可变化性小，而点阵式液晶显示屏以点的形式显示，几乎可显示任何字符图形内容。点阵式液晶显示屏外形如图 8-16 所示。

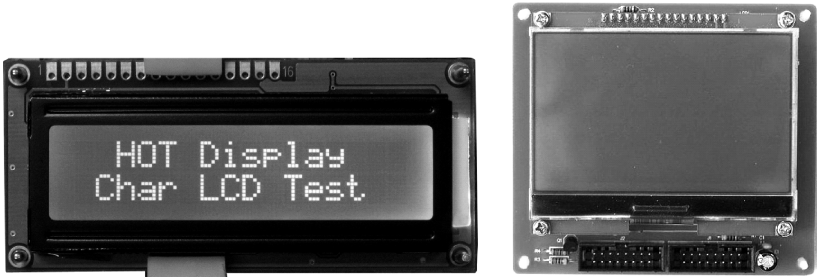


图 8-16 点阵式液晶显示屏外形

2. 结构与工作原理

图 8-17a 为 5×5 点阵式液晶显示屏的结构示意图，它是在封装有液晶的下玻璃内表面涂有 5 条行电极，在上玻璃内表面涂有 5 条透明列电极，从上往下看，行电极与列电极有 25 个交点，每个交点相当于一个点（又称像素）。

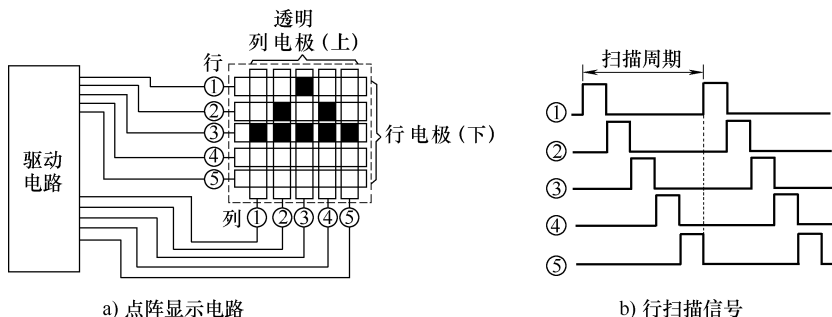


图 8-17 点阵式液晶屏显示原理说明

点阵式液晶屏与点阵 LED 显示屏一样，也采用扫描方式，也可分为三种方式：行扫描、列扫描和点扫描。下面以显示“ Δ ”图形为例来说明最为常用的行扫描方式。

在显示前，让点阵所有行、列线电压相同，这样下行线与上列线之间不存在电压差，中间的液晶处于透明。在显示时，首先让行①线为 1（高电平），如图 8-17b 所示，列①~⑤线为 11011，第①行电极与第③列电极之间存在电压差，其夹持的液晶不透明；然后让行②线为 1，列①~⑤线为 10101，第②行与第②、④列夹持的液晶不透明；再让行③线为 1，列①~⑤线为 00000，第③行与第①~⑤列夹持的液晶都不透明；接着让行④线为 1，列①~⑤线为 11111，第 4 行与第①~⑤列夹持的液晶全透明，最后让行⑤线为 1，列①~⑤为 11111，第 5 行与第①~⑤列夹持的液晶全透明。第 5 行显示后，由于人眼的视觉暂留特性，会觉得前面几行内容还在亮，整个点阵显示一个“ Δ ”图形。

点阵式液晶显示屏由反射型和透射型之分，如图 8-18 所示，反射型 LCD 屏依靠液晶不透明来反射光线显示图形，如电子表显示屏、数字万用表的显示屏等都是利用液晶不透明（通常为黑色）来显示数字，透射型 LCD 屏依靠光线透过透明的液晶来显示图像，如手机显示屏、



液晶电视显示屏等都是采用透射方式显示图像。

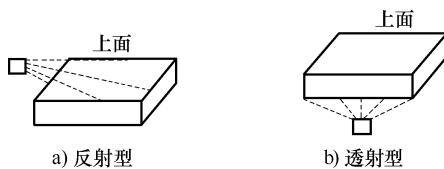


图 8-18 点阵式液晶显示屏的类型

图 8-18a 所示的点阵为反射型 LCD 屏，如果将它改成透射型 LCD 屏，行、列电极均需为透明电极，另外还要用光源（背光源）从下往上照射 LCD 屏，显示屏的 25 个液晶点像 25 个小门，液晶点透明相当于门打开，光线可透过小门从上玻璃射出，该点看起来为白色（背光源为白色），液晶点不透明相当于门关闭，该点看起来为黑色。

第 9 章

晶 闸 管

9.1 单向晶闸管

9.1.1 实物外形与符号

单向晶闸管有 3 个电极，分别是阳极 (A)、阴极 (K) 和门极 (G)。图 9-1a 是一些常见的单向晶闸管的实物外形，图 9-1b 为单向晶闸管的电路符号。



图 9-1 单向晶闸管

9.1.2 结构原理

1. 结构

单向晶闸管的内部结构和等效电路图如图 9-2 所示。

单向晶闸管内部结构如图 9-2a 所示，它相当于 PNP 型晶体管和 NPN 型晶体管以图 9-2b 所示的方式连接而成。

2. 工作原理

下面以图 9-3 所示的电路来说明单向晶闸管的工作原理。

电源 E_2 通过 R_2 为单向晶闸管 A、K 极提供正向电压 U_{AK} ，电源 E_1 经电阻 R_1 和开关 S 为单向晶闸管 G、K 极提供正向电压 U_{GK} ，当开关 S 处于断开状态时， VT_1 无 I_{bl} 电流而无法导通， VT_2 也无法导通，单向晶

闸管处于截止状态， I_2 电流为 0。

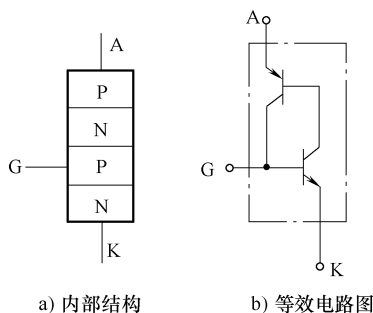


图 9-2 单向晶闸管的内部结构与等效电路图

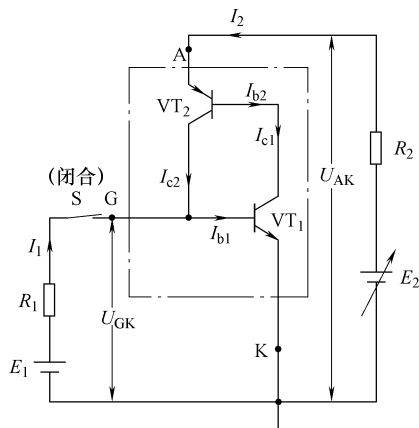


图 9-3 单向晶闸管的工作原理说明图

如果将开关 S 闭合，电源 E_1 马上通过 R_1 、S 为 VT_1 提供 I_{b1} 电流， VT_1 导通， VT_2 也导通（ VT_2 的 I_{b2} 电流经过 VT_1 的 c、e 极）， VT_2 导通后，它的 I_{c2} 电流与 E_1 提供的电流汇合形成更大的 I_{b1} 电流流经 VT_1 的发射结， VT_1 导通更深， I_{c1} 电流更大， VT_2 的 I_{b2} 也增大（ VT_2 的 I_{b2} 与 VT_1 的 I_{c1} 相等）， I_{c2} 增大，这样会形成强烈的正反馈，正反馈过程是

$$I_{b1} \uparrow \rightarrow I_{c1} \uparrow \rightarrow I_{b2} \uparrow \rightarrow I_{c2} \uparrow$$

正反馈使 VT_1 、 VT_2 都进入饱和状态, I_{b2} 、 I_{c2} 都很大, I_{b2} 、 I_{c2} 都由 VT_2 的发射极流入, 也即单向晶闸管 A 极流入, I_{b2} 、 I_{c2} 电流在内部流经 VT_1 、 VT_2 后从 K 极输出。很大的电流从单向晶闸管 A 极流入, 然后从 K 极流出, 相当于单向晶闸管导通。

单向晶闸管导通后, 若断开开关 S, I_{b2} 、 I_{c2} 电流继续存在, 单向晶闸管继续导通。这时如果慢慢调低电源 E_2 的电压, 流入单向晶闸管 A 极的电流 (即图中的 I_2 电流) 也慢慢减小, 当电源电压调到很低时 (接近 0V), 流入 A 极的电流接近 0, 单向晶闸管进入截止状态。

综上所述, 单向晶闸管有以下性质:

- 1) 无论 A、K 极之间加什么电压, 只要 G、K 极之间没有加正向电压, 单向晶闸管就无法导通。
- 2) 只有 A、K 极之间加正向电压, 并且 G、K 极之间也加一定的正向电压, 单向晶闸管才能导通。
- 3) 单向晶闸管导通后, 撤掉 G、K 极之间的正向电压后单向晶闸管仍继续导通。要让导通的单向晶闸管截止, 可采用两种方法: 一是让流入单向晶闸管 A 极的电流减小到某一值 I_H (维持电流), 单向晶闸管会截止; 二是让 A、K 极之间的正向电压 U_{AK} 减小到 0 或为反向电压, 也可以使单向晶闸管由导通转为截止。

9.1.3 主要参数

1. 正向断态重复峰值电压 U_{DRM}

正向断态重复峰值电压是指在 G 极开路 and 单向晶闸管阻断的条件下, 允许重复加到 A、K 极之间的最大正向峰值电压。一般所说电压为多少伏的单向晶闸管指的就是该值。

2. 反向重复峰值电压 U_{RRM}

反向重复峰值电压是指在 G 极开路, 允许加到单向晶闸管 A、K 极之间的最大反向峰值电压。一般 U_{RRM} 与 U_{DRM} 接近或相等。

3. 门极触发电压 U_{GT}

在室温条件下, A、K 极之间加 6V 电压时, 使晶闸管从截止转为导通所需的最小门极 (G 极) 直流电压。

4. 门极触发电流 I_{GT}

在室温条件下, A、K 极之间加 6V 电压时, 使晶闸管从截止变为导

通所需的门极最小直流电流。

5. 通态平均电流 I_T

通态平均电流又称额定态平均电流，是指在环境温度不大于 40℃ 和标准的散热条件下，可以连续通过 50Hz 正弦波电流的平均值。

6. 维持电流 I_H

维持电流是指在 G 极开路时，维持单向晶闸管继续导通的最小正向电流。

9.1.4 选用

在选用晶闸管时，要注意以下事项：

1) 晶闸管的类型很多，有单向晶闸管、双向晶闸管等，选用时先要确定选用的类型符号电路要求。

2) 选用的晶闸管的正、反向重复峰值电压 U_{DRM} 、 U_{RRM} 应高于电路可能出现的最高电压，尽量高 2 ~ 3 倍，如有必要，还应给晶闸管增加过电压保护电路。

3) 选用的晶闸管的通态平均电流 I_T 应大于电路可能出现的最大平均电流，还应留 1.5 ~ 2 倍余量，如有必要，可给晶闸管增加过电流保护电路。

4) 为了确保能可靠触发导通，选用的晶闸管的门极触发电压 U_{GT} 和电流 I_{GT} 应略小于电路能提供的触发电压和电流。

9.1.5 晶闸管的型号命名方法

国产晶闸管的型号命名主要由 4 部分组成。

第一部分用字母“K”表示主称为晶闸管。

第二部分用字母表示晶闸管的类别。

第三部分用数字表示晶闸管的额定通态电流值。

第四部分用数字表示重复峰值电压级数。

国产晶闸管型号命名及含义见表 9-1。

表 9-1 国产晶闸管的型号命名及含义

第一部分：主称		第二部分：类别		第三部分：额定通态电流		第四部分： 重复峰值电压级数	
字母	含义	字母	含义	数字	含义	数字	含义
K	晶闸管	P	普通反向 阻断型	1	1A	1	100V
				5	5A	2	200V
				10	10A	3	300V
				20	20A	4	400V
		K	快速反向 阻断型	30	30A	5	500V
				50	50A	6	600V
				100	100A	7	700V
				200	200A	8	800V
		S	双向型	300	300A	9	900V
				400	400A	10	1000V
				500	500A	12	1200V
						14	1400V

例如：

KP1-2 (1A 200V 普通反向阻断型晶闸管)	KS5-4 (5A 400V 双向晶闸管)
K—晶闸管	K—晶闸管
P—普通反向阻断型	S—双向管
1—通态电流 1A	5—通态电流 5A
2—重复峰值电压 200V	4—重复峰值电压 400V

9.2 门极关断晶闸管

门极关断晶闸管是晶闸管的一种派生器件，除了具有普通晶闸管触发导通功能外，还可以通过在 G、K 极之间加反向电压将晶闸管关断。

9.2.1 外形、结构与符号

门极关断（GTO）晶闸管如图 9-4 所示，从图中可以看出，门极关断晶闸管与普通的晶闸管（SCR）结构相似，但为了实现关断功能，门极关断晶闸管的两个等效晶体管的放大倍数较 SCR 的小，另外制造工艺

上也有所改进。

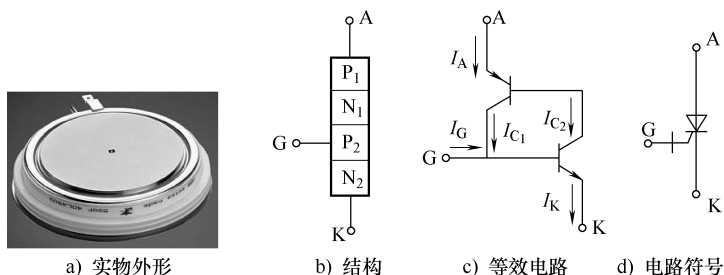


图 9-4 门极关断晶闸管

9.2.2 工作原理

门极关断晶闸管工作原理说明如图 9-5 所示。

电源 E_3 通过 R_3 为门极关断晶闸管的 A、K 极之间提供正向电压 U_{AK} ，电源 E_1 、 E_2 通过开关 S 为门极关断晶闸管的 G 极提供正压或负压。当开关 S 置于“1”时，电源 E_1 为门极关断晶闸管的 G 极提供正压 ($U_{GK} > 0$)，门极关断晶闸管导通，有电流从 A 极流入，从 K 极流出；当开关 S 置于“2”时，电源 E_2 为门极关断晶闸管的 G 极提供负压 ($U_{GK} < 0$)，门极关断晶闸管马上关断，电流无法从 A 极流入。

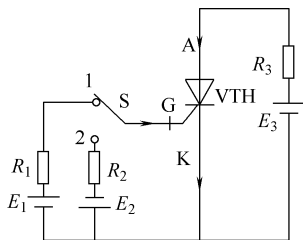


图 9-5 门极关断晶闸管
工作原理说明图

普通晶闸管 (SCR) 和门极关断晶闸管共同点是给 G 极加正压后都会触发导通，撤去 G 极电压会继续处于导通；不同点在于 SCR 的 G 极加负压时仍会导通，而门极关断晶闸管的 G 极加负压时会关断。

9.3 双向晶闸管

9.3.1 符号与结构

双向晶闸管电路符号与结构如图 9-6 所示，双向晶闸管有 3 个电

极：主电极 T_1 、主电极 T_2 和门极 G 。

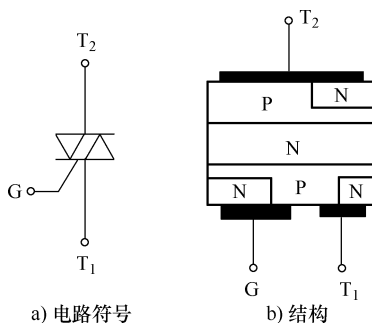


图 9-6 双向晶闸管

9.3.2 工作原理

单向晶闸管只能单向导通，而双向晶闸管可以双向导通。下面分几种情况来说明双向晶闸管的工作原理。

1) 当 T_2 、 T_1 极之间加正向电压（即 $U_{T_2} > U_{T_1}$ ）时，如图 9-7a 所示。

在这种情况下，若 G 极无电压，则 T_2 、 T_1 极之间不导通；若在 G 、 T_1 极之间加正向电压（即 $U_G > U_{T_1}$ ）， T_2 、 T_1 极之间马上导通，电流由 T_2 极流入，从 T_1 极流出，此时撤去 G 极电压， T_2 、 T_1 极之间仍处于导通状态。

也就是说，当 $U_{T_2} > U_G > U_{T_1}$ 时，双向晶闸管导通，电流由 T_2 极流向 T_1 极，撤去 G 极电压后，晶闸管继续处于导通状态。

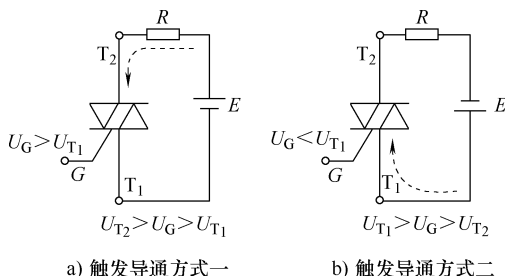


图 9-7 双向晶闸管的两种触发导通方式



2) 当 T_2 、 T_1 极之间加反向电压 (即 $U_{T_2} < U_{T_1}$) 时, 如图 9-7b 所示。

在这种情况下, 若 G 极无电压, 则 T_2 、 T_1 极之间不导通; 若在 G 、 T_1 极之间加反向电压 (即 $U_G < U_{T_1}$), T_2 、 T_1 极之间马上导通, 电流由 T_1 极流入, 从 T_2 极流出, 此时撤去 G 极电压, T_2 、 T_1 极之间仍处于导通状态。

也就是说, 当 $U_{T_1} > U_G > U_{T_2}$ 时, 双向晶闸管导通, 电流由 T_1 极流向 T_2 极, 撤去 G 极电压后, 晶闸管继续处于导通状态。

双向晶闸管导通后, 撤去 G 极电压, 会继续处于导通状态, 在这种情况下, 要使双向晶闸管由导通进入截止, 可采用以下任意一种方法:

- 1) 让流过主电极 T_1 、 T_2 的电流减小至维持电流以下。
- 2) 让主电极 T_1 、 T_2 之间电压为 0 或改变两极间电压的极性。

第 10 章

场效应晶体管与 IGBT

10.1 结型场效应晶体管

场效应晶体管 (Field Effect Transistor, FET) 与晶体管一样, 具有放大能力。场效应晶体管有漏极 (D)、栅极 (G) 和源极 (S)。场效应晶体管可分为结型和绝缘栅型两种类型, 本节介绍结型场效应晶体管。

10.1.1 外形与符号

图 10-1a 是结型场效应晶体管的实物外形, 图 10-1b 为结型场效应晶体管的电路符号。

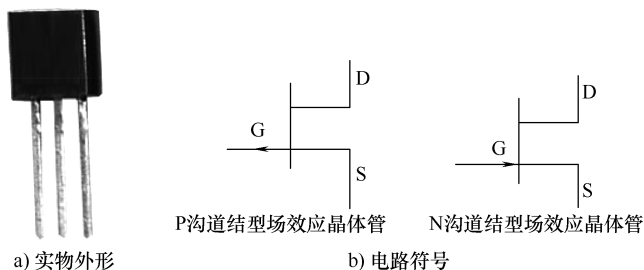


图 10-1 结型场效应晶体管

10.1.2 结构与原理

1. 结构

与晶体管一样, 场效应晶体管也是由 P 型半导体和 N 型半导体组成, 晶体管有 PNP 型和 NPN 型两种, 场效应晶体管则分 P 沟道和 N 沟道两种。两种沟道的结型场效应晶体管的结构如图 10-2 所示。

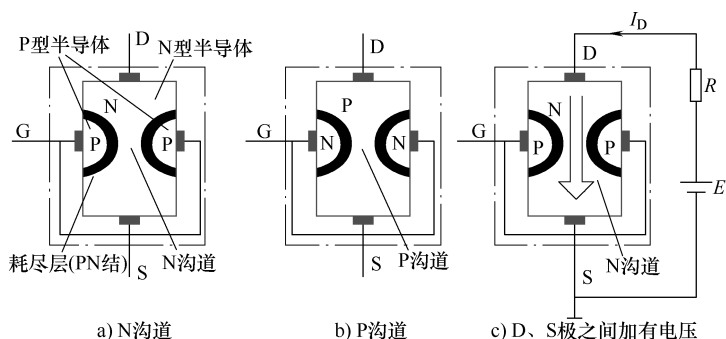


图 10-2 结型场效应晶体管的结构

图 10-2a 为 N 沟道结型场效应晶体管的结构图，从图中可以看出，场效应晶体管内部有两块 P 型半导体，它们通过导线内部相连，再引出一个电极，该电极称栅极 G，两块 P 型半导体以外的部分均为 N 型半导体，在 P 型半导体与 N 型半导体交界处形成两个耗尽层（即 PN 结），耗尽层中间区域为沟道，由于沟道由 N 型半导体构成，所以称为 N 沟道，漏极 D 与源极 S 分别接在沟道两端。

图 10-2b 为 P 沟道结型场效应晶体管的结构图，P 沟道场效应晶体管内部有两块 N 型半导体，栅极 G 与它们连接，两块 N 型半导体与邻近的 P 型半导体在交界处形成两个耗尽层，耗尽层中间区域为 P 沟道。

如果在 N 沟道结型场效应晶体管 D、S 极之间加电压，如图 10-2c 所示，电源正极输出的电流就会由场效应晶体管 D 极流入，在内部通过沟道从 S 极流出，回到电源的负极。场效应晶体管流过电流的大小与沟道的宽窄有关，沟道越宽，能通过的电流越大。

2. 工作原理

结型场效应晶体管在电路中主要用作放大信号电压。下面通过图 10-3 来说明结型场效应晶体管的工作原理。

在图 10-3 点画线框内为 N 沟道结型场效应晶体管结构图。当在 D、S 极之间加上正向电压 U_{DS} ，会有电流从 D 极流向 S 极，若再在 G、S 极之间加上反向电压 U_{GS} （P 型半导体接低电位，N 型半导体接高电位），场效应晶体管内部的两个耗尽层变厚，沟道变窄，由 D 极流向 S 极的电流 I_D 就会变小，反向电压越高，沟道越窄， I_D 电流越小。

由此可见，改变 G、S 极之间的电压 U_{GS} ，就能改变从 D 极流向 S

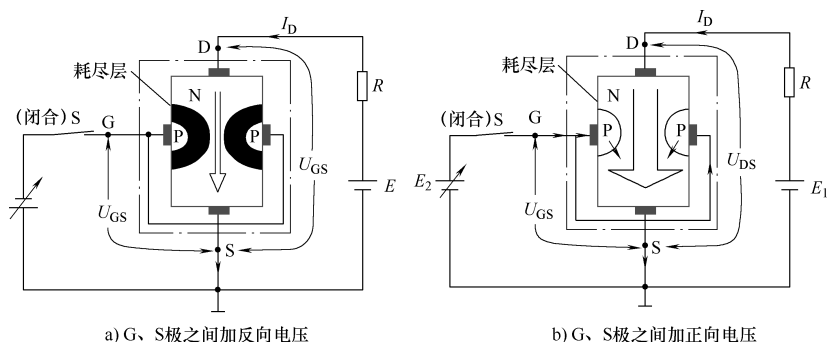


图 10-3 结型场效应晶体管的工作原理

极的电流 I_D 的大小, 并且 I_D 电流变化较 U_{GS} 电压变化大得多, 这就是场效应晶体管的放大原理。场效应晶体管的放大能力大小用跨导 g_m 表示, 即

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$$

g_m 反映了栅源电压 U_{GS} 对漏极电流 I_D 的控制能力, 是表征场效应晶体管放大能力的一个重要的参数 (相当于晶体管的 β), g_m 的单位是西门子 (S), 也可以用 A/V 表示。

若给 N 沟道结型场效应晶体管的 G、S 极之间加正向电压, 如图 10-3b 所示, 场效应晶体管内部两个耗尽层都会导通, 耗尽层消失, 不管如何增大 G、S 间的正向电压, 沟道宽度都不变, I_D 电流也不变化。也就是说, 当给 N 沟道结型场效应晶体管 G、S 极之间加正向电压时, 无法控制 I_D 电流变化。

在正常工作时, N 沟道结型场效应晶体管 G、S 极之间应加反向电压, 即 $U_G < U_S$, $U_{GS} = U_G - U_S$ 为负压; P 沟道结型场效应晶体管 G、S 极之间应加正向电压, 即 $U_G > U_S$, $U_{GS} = U_G - U_S$ 为正压。

10.1.3 主要参数

1. 跨导 g_m

跨导是指当 U_{DS} 为某一定值时, I_D 电流的变化量与 U_{GS} 电压变化量的比值, 即

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$$

跨导反映了栅-源电压对漏极电流的控制能力。

2. 夹断电压 U_p

夹断电压是指当 U_{DS} 为某一定值，让 I_D 电流减小到近似为 0 时的 U_{GS} 电压值。

3. 饱和漏极电流 I_{DSS}

饱和漏极电流是指当 $U_{GS}=0$ 且 $U_{DS} > U_p$ 时的漏极电流。

4. 最大漏-源电压 U_{DS}

最大漏-源电压是指漏极与源极之间的最大反向击穿电压，即当 I_D 急剧增大时的 U_{DS} 值。

10.1.4 场效应晶体管的型号命名方法

场效应晶体管型号命名现行有两种方法：

第一种方法与晶体管相同。第一位“3”表示电极数；第二位字母代表材料，“D”是 P 型硅 N 沟道，“C”是 N 型硅 P 沟道；第三位字母“J”代表结型场效应晶体管，“O”代表绝缘栅场效应晶体管。例如 3DJ6D 是 N 沟道结型场效应晶体管，3DO6C 是 N 沟道绝缘栅型场效应晶体管。

第二种命名方法是 CS××#，CS 代表场效应晶体管，××以数字代表型号的序号，#用字母代表同一型号中的不同规格。例如 CS14A、CS45G 等。

10.2 绝缘栅型场效应晶体管

绝缘栅型场效应晶体管（MOSFET）简称 MOS 管，绝缘栅型场效应晶体管分为耗尽型和增强型，每种类型又分为 P 沟道和 N 沟道。

10.2.1 增强型 MOS 管

1. 电路符号

增强型 MOS 管分为 N 沟道 MOS 管和 P 沟道 MOS 管，其电路符号如图 10-4 所示。

2. 结构与原理

增强型 MOS 管有 N 沟道和 P 沟道之分，分别称作增强型 NMOS 管和增强型 PMOS 管，其结构与工作原理基本相似，在实际中增强型 NMOS 管更为常用。下面以增强型 NMOS 管为例来说明增强型 MOS 管的结构与工作原理。

(1) 结构 增强型 NMOS 管的结构与等效符号如图 10-5 所示。

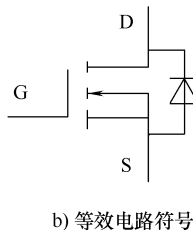
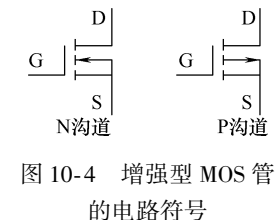
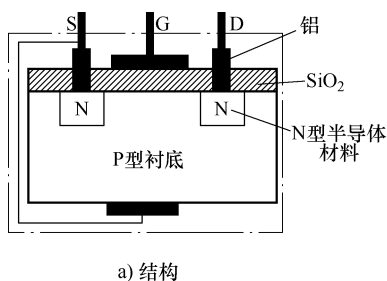


图 10-5 增强型 NMOS 管

增强型 NMOS 管是以 P 型硅片作为基片 (又称衬底)，在基片上制作两个含很多杂质的 N 型材料，再在上面制作一层很薄的二氧化硅 (SiO_2) 绝缘层，在两个 N 型材料上引出两个铝电极，分别称为漏极 (D) 和源极 (S)，在两极中间的 SiO_2 绝缘层上制作一层铝制导电层，从该导电层上引出电极称为 G 极。P 型衬底与 D 极连接的 N 型半导体材料会形成二极管结构 (称之为寄生二极管)，由于 P 型衬底通常与 S 极连接在一起，所以增强型 NMOS 管又可用图 10-5b 所示的符号表示。

(2) 工作原理 增强型 NMOS 管需要加合适的电压才能工作。加有电压的增强型 NMOS 管如图 10-6 所示，图 10-6a 为结构图形式，图 10-6b 为电路图形式。

如图 10-6a 所示，电源 E_1 通过 R_1 接 D、S 极，电源 E_2 通过开关 S 接 G、S 极。在开关 S 断开时，G 极无电压，D、S 极所接的两个 N 区之间没有导电沟道，所以两个 N 区之间不能导通， I_D 电流为 0；如果将开关 S 闭合，G 极获得正电压，与 G 极连接的铝电极有正电荷，它产生的电场穿过 SiO_2 层，将 P 衬底很多电子吸引靠近 SiO_2 层，从而在两个 N

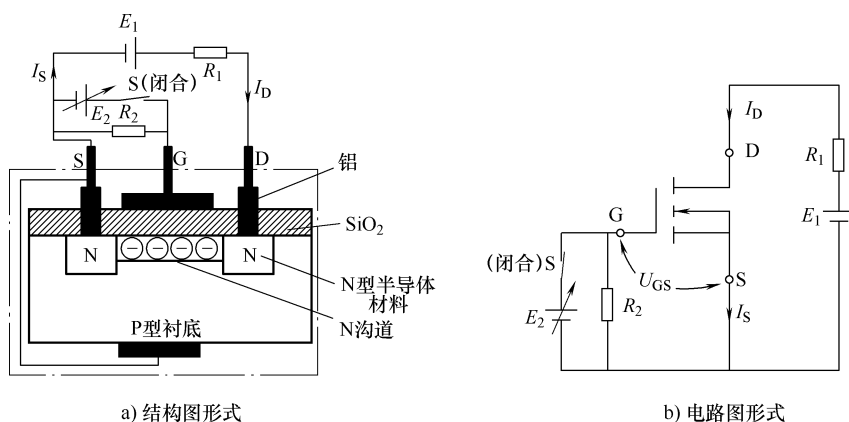


图 10-6 加有电压的增强型 NMOS 管

区之间出现导电沟道，由于此时 D、S 极之间加上正向电压，就有 I_D 电流从 D 极流入，再经导电沟道从 S 极流出。

如果改变 E_2 电压的大小，也即是改变 G、S 极之间的电压 U_{GS} ，与 G 极相通的铝层产生的电场大小就会变化， SiO_2 下面的电子数量就会变化，两个 N 区之间沟道宽度就会变化，流过的 I_D 电流大小就会变化。 U_{GS} 电压越高，沟道就会越宽， I_D 电流就会越大。

由此可见，改变 G、S 极之间的电压 U_{GS} ，D、S 极之间的内部沟道宽窄就会发生变化，从 D 极流向 S 极的 I_D 电流大小也就发生变化，并且 I_D 电流变化较 U_{GS} 电压变化大得多，这就是场效应晶体管的放大原理（即电压控制电流变化原理）。为了表示场效应晶体管的放大能力，引入一个参数——跨导 g_m ， g_m 用下面的公式计算：

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$$

g_m 反映了栅源电压 U_{GS} 对漏极电流 I_D 的控制能力，是表述场效应晶体管放大能力的一个重要的参数（相当于晶体管的 β ）， g_m 的单位是西门子（S），也可以用 A/V 表示。

增强型绝缘栅场效应晶体管具有特点是：在 G、S 极之间未加电压（即 $U_{GS} = 0$ ）时，D、S 极之间没有沟道， $I_D = 0$ ；当 G、S 极之间加上合适电压（大于开启电压 U_T ）时，D、S 极之间有沟道形成， U_{GS} 电压变化时，沟道宽窄会发生变化， I_D 电流也会变化。

对于 N 沟道增强型绝缘栅场效应晶体管，G、S 极之间应加正电压（即 $U_G > U_S$ ， $U_{GS} = U_G - U_S$ 为正压），D、S 极之间才会形成沟道；对于 P 沟道增强型绝缘栅场效应管，G、S 极之间须加负电压（即 $U_G < U_S$ ， $U_{GS} = U_G - U_S$ 为负压），D、S 极之间才有沟道形成。

10.2.2 耗尽型 MOS 管

1. 电路符号

耗尽型 MOS 管也有 N 沟道和 P 沟道之分，其电路符号如图 10-7 所示。

2. 结构与原理

P 沟道和 N 沟道的耗尽型场效应晶体管工作原理基本相同，下面以 N 沟道耗尽型 MOS 管（简称耗尽型 NMOS 管）为例来说明耗尽型 MOS 管的结构与原理。耗尽型 NMOS 管的结构与等效符号如图 10-8 所示。

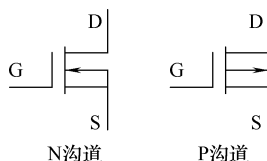


图 10-7 耗尽型 MOS 管的电路符号

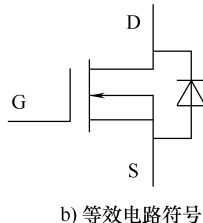
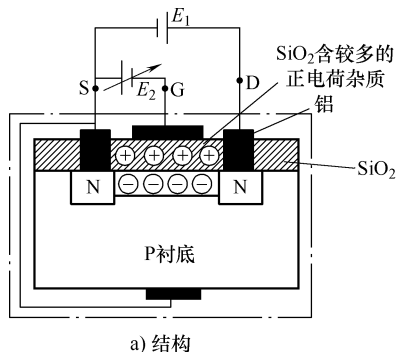


图 10-8 N 沟道增强型绝缘栅场效应晶体管

N 沟道耗尽型绝缘栅场效应晶体管是以 P 型硅片作为基片（又称衬底），在基片上再制作两个含很多杂质的 N 型材料，再在上面制作一层很薄的二氧化硅（ SiO_2 ）绝缘层，在两个 N 型材料上引出两个铝电极，分别称为漏极（D）和源极（S），在两极中间的 SiO_2 绝缘层上制作一层铝制导电层，从该导电层上引出电极称为 G 极。

与增强型绝缘栅场效应晶体管不同的是，在耗尽型绝缘栅场效应晶

体管内的 SiO_2 中掺入大量的杂质，其中含有大量的正电荷，它将衬底中大量的电子吸引靠近 SiO_2 层，从而在两个 N 区之间出现导电沟道。

当场效应晶体管 D、S 极之间加上电源 E_1 时，由于 D、S 极所接的两个 N 区之间有导电沟道存在，所以有 I_D 电流流过沟道；如果再在 G、S 极之间加上电源 E_2 ， E_2 的正极除了接 S 极外，还与下面的 P 衬底相连， E_2 的负极则与 G 极的铝层相通，铝层负电荷电场穿过 SiO_2 层，排斥 SiO_2 层下方的电子，从而使导电沟道变窄，流过导电沟道的 I_D 电流减小。

如果改变 E_2 电压的大小，与 G 极相通的铝层产生的电场大小就会变化， SiO_2 下面的电子数量就会变化，两个 N 区之间沟道宽度就会变化，流过的 I_D 电流大小就会变化。例如 E_2 电压增大，G 极负电压更低，沟道就会变窄， I_D 电流就会减小。

耗尽型绝缘栅场效应晶体管具有特点是：在 G、S 极之间未加电压（即 $U_{GS}=0$ ）时，D、S 极之间就有沟道存在， I_D 不为 0；当 G、S 极之间加上负电压 U_{GS} 时，如果 U_{GS} 电压变化，沟道宽窄会发生变化， I_D 电流就会变化。

在工作时，N 沟道耗尽型绝缘栅场效应晶体管 G、S 极之间应加负电压，即 $U_G < U_S$ ， $U_{GS} = U_G - U_S$ 为负压；P 沟道耗尽型绝缘栅场效应晶体管 G、S 极之间应加正电压，即 $U_G > U_S$ ， $U_{GS} = U_G - U_S$ 为正压。

10.2.3 场效应晶体管的选用

在选择场效应晶体管时，要注意以下事项：

1) 根据电路需要选择合适类型的场效应晶体管。高阻抗输入放大、调制、阻抗变换等电路，可选用结型场效应晶体管；音频功率放大器、开关电源、逆变器、电源转换器等电路，可选用功率较大的 MOS 管。

2) 选用的场效应晶体管的主要参数应满足电路要求。选用大功率 MOS 管时，其击穿电压、耗散功率、漏极电流应高于电路要求，选用小功率场效应晶体管时应注意输入阻抗、跨导、夹断电压和击穿电压等与电路要求基本一致。

3) 在选择对管时，应选用同厂同批号的，这样参数一致性好，尽量选用专用配对管，其夹断电压和跨导一致好。

4) MOS 管栅极的输入阻抗很高，容易被击穿，在存储或操作 MOS

管时，防止带静电的物体接触引脚，在存储时要将各引脚短路，并用金属屏蔽袋包装，以防止外来感应电压将栅极击穿，不要将 MOS 管放入塑料袋（盒）中。在 MOS 管接入电路之前，管子全部引脚应保持短接状态，焊接完成后才可拆除短接材料。

5) 在安装大功率 MOS 管时，其位置要避免靠近发热元件，管子要有良好的散热条件，最好配置良好的散热器，保证管子温度不超过额定值，这样才能长期稳定可靠工作。

10.3 绝缘栅双极型晶体管

绝缘栅双极型晶体管是一种由场效应晶体管和晶体管组合成的复合元件，简称为 IGBT，它综合了晶体管和 MOS 管的优点，故有很好的特性，因此广泛应用在各种中小功率的电力电子设备中。

10.3.1 外形、结构与符号

IGBT 的实物外形、结构及等效图和符号如图 10-9 所示，从等效图可以看出，IGBT 相当于一个 PNP 型晶体管和增强型 NMOS 管以图 10-9c 所示的方式组合而成。IGBT 有 3 个极：C 极（集电极）、G 极（栅极）和 E 极（发射极）。

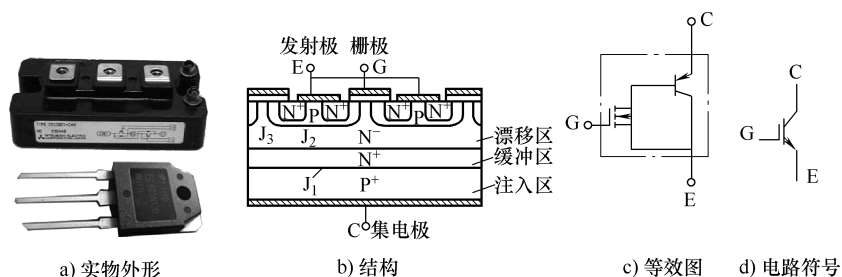


图 10-9 绝缘栅双极型晶体管

10.3.2 工作原理

图 10-9 中的 IGBT 是由 PNP 型晶体管和 N 沟道 MOS 管组合而成，这种 IGBT 称作 N-IGBT，用图 10-9d 所示符号表示，相应的还有 P 沟道

IGBT，称作 P-IGBT，将图 10-9d 所示符号中的箭头改为由 E 极指向 G 极即为 P-IGBT 的电路符号。

由于电力电子设备中主要采用 N-IGBT，下面以图 10-10 所示电路来说明 N-IGBT 工作原理。

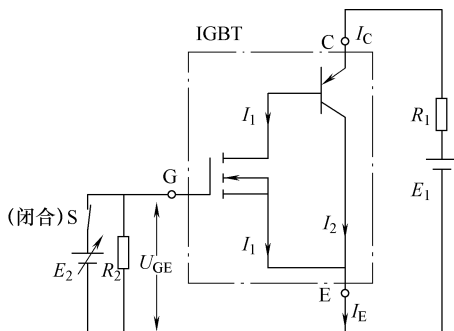


图 10-10 N-IGBT 工作原理说明图

电源 E_2 通过开关 S 为 IGBT 提供 U_{GE} 电压，电源 E_1 经 R_1 为 IGBT 提供 U_{CE} 电压。当开关 S 闭合时，IGBT 的 G、E 极之间获得电压 U_{GE} ，只要 U_{GE} 电压大于开启电压（2~6V），IGBT 内部的 NMOS 管就有导电沟道形成，MOS 管 D、S 极之间导通，为晶体管 I_b 电流提供通路，晶体管导通，有电流 I_c 从 IGBT 的 C 极流入，经晶体管发射极后分成 I_1 和 I_2 两路电流， I_1 电流流经 MOS 管的 D、S 极， I_2 电流从晶体管的集电极流出， I_1 、 I_2 电流汇合成 I_E 电流从 IGBT 的 E 极流出，即 IGBT 处于导通状态。当开关 S 断开后， U_{GE} 电压为 0，MOS 管导电沟道夹断（消失）， I_1 、 I_2 都为 0， I_c 、 I_E 电流也为 0，即 IGBT 处于截止状态。

调节电源 E_2 可以改变 U_{GE} 电压的大小，IGBT 内部的 MOS 管的导电沟道宽度会随之变化， I_1 电流大小会发生变化，由于 I_1 电流实际上是晶体管的 I_b 电流， I_1 细小的变化会引起 I_2 电流（ I_2 为晶体管的 I_c 电流）的急剧变化。例如当 U_{GE} 增大时，MOS 管的导通沟道变宽， I_1 电流增大， I_2 电流也增大，即 IGBT 的 C 极流入、E 极流出的电流增大。

第 11 章

继电器与干簧管

11.1 继电器

11.1.1 外形与符号

继电器是一种利用电磁原理来控制触点开关通断的元器件。图 11-1a 是一些常见继电器实物外形，图 11-1b 为继电器的电路符号。

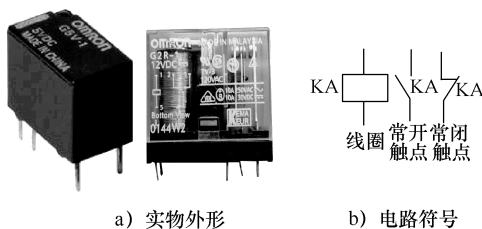


图 11-1 继电器

11.1.2 结构与应用

1. 结构

继电器是利用线圈通过电流产生磁场，来吸合衔铁而使触点断开或接通的。继电器内部结构如图 11-2 所示。从图中可以看出，继电器主要由线圈、铁心、衔铁、弹簧、动触点、常闭触点（动断触点）、常开触点（动合触点）和一些接线端等组成。

当线圈接线端 1、2 脚未通电时，依靠弹簧的拉力将动触点与常闭触点接触，4、5 脚接通。当线圈接线端 1、2 脚通电时，有电流流过线圈，线圈产生磁场吸合衔铁，衔铁移动，将动触点与常开触点接触，3、4 脚接通。

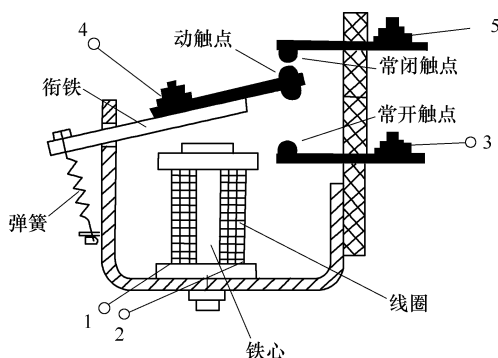


图 11-2 继电器的结构

2. 应用

继电器典型应用电路如图 11-3 所示。

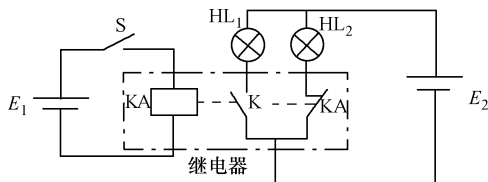


图 11-3 继电器典型应用电路

当开关 S 断开时，继电器线圈无电流流过，线圈没有磁场产生，继电器的常开触点断开，常闭触点闭合，灯泡 HL_1 不亮，灯泡 HL_2 亮。

当开关 S 闭合时，继电器的线圈有电流流过，线圈产生磁场吸合内部衔铁，使常开触点闭合、常闭触点断开，结果灯泡 HL_1 亮，灯泡 HL_2 熄灭。

11.1.3 主要参数

1. 额定工作电压

额定工作电压是指继电器正常工作时线圈所需要的电压。根据继电器的型号不同，可以是交流电压，也可以是直流电压。继电器线圈所加的工作电压一般不要超过额定工作电压的 1.5 倍。

2. 吸合电流

吸合电流是指继电器能够产生吸合动作的最小电流。在正常使用

时，通过线圈的电流必须略大于吸合电流，这样继电器才能稳定地工作。

3. 直流电阻

直流电阻是指继电器中线圈的直流电阻，直流电阻的大小可以用万用表来测量。

4. 释放电流

释放电流是指继电器产生释放动作的最大电流。当继电器线圈的电流减小到释放电流值时，继电器就会恢复到释放状态。释放电流远远小于吸合电流。

5. 触点电压和电流

触点电压和电流又称触点负荷，是指继电器触点允许承受的电压和电流。在使用时，不能超过此值，否则继电器的触点容易损坏。

11.1.4 选用

在选用继电器时，要注意以下事项：

1) 根据电路需要确定继电器触点的类型（常开、常闭）和数量，不要盲目选择多组触点型继电器，以免造成浪费。

2) 继电器的触点电压和电流应高于在电路中实际承受的电压和电流值。对于阻值负载（如灯泡），可按高于 15% 选择；对于感性和容性负载（如线圈和电容器），可按高于 30% 选择。

3) 继电器的线圈电压应与电路提供的电压相同。若继电器的线圈电压低于电路提供的电压，线圈易被烧坏，若继电器的线圈电压高于电路提供的电压，继电器触点可能无法吸合或吸力不足。

4) 不要将多个小功率继电器并联来替代大功率继电器，因为多个小功率继电器并联使用时，即使同时为这些继电器线圈提供电压，它们的触点动作时间也不完全相同，先动作的触点承受很大的功率，可能会被烧坏。

11.1.5 继电器的型号命名方法

国产继电器的型号命名由 4 部分组成。

第一部分用字母表示继电器的主称类型。

第二部分用字母表示继电器的形状特征。

第三部分用数字表示产品序号。
第四部分用字母表示防护特征。
国产继电器的型号命名及含义见表 11-1。

表 11-1 国产继电器的型号命名及含义

第一部分：主称类型		第二部分：形状特征		第三部分：序号	第四部分：防护特征	
字母	含义	字母	含义	用数字表示 产品序号	字母	含义
JR	小功率继电器	W	微型		F	封闭式
JZ	中功率继电器					
JQ	大功率继电器					
JC	磁电式继电器	X	小型		M	密封式
JU	热继电器或温度继电器					
JT	特种继电器					
JM	脉冲继电器	C	超小型			
JS	时间继电器					
JAG	干簧式继电器					

例如：JRX-13F 是封闭式小功率小型继电器。其中，JR 代表小功率继电器；X 代表小型；13 代表序号；F 代表封闭式。

11.2 干簧管与干簧管继电器

11.2.1 外形与符号

1. 干簧管外形与符号

干簧管是一种利用磁场直接磁化触点而让触点开关产生接通或断开动作的元器件。图 11-4a 是一些常见干簧管的实物外形，图 11-4b 为干簧管的电路符号。

2. 干簧管继电器外形与符号

图 11-4 中的干簧管内部只有常开或常闭触点，还有一些干簧管不但有触点，还有线圈，这种干簧管称为干簧管继电器。图 11-5a 列出一些常见的干簧管继电器，图 11-5b 为干簧管继电器的电路符号。

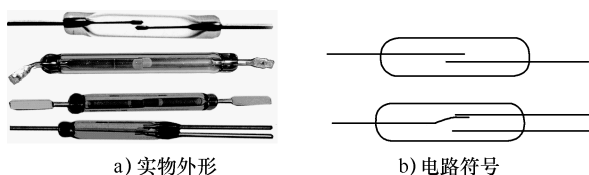


图 11-4 干簧管

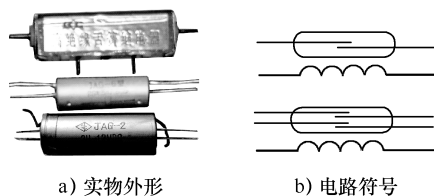


图 11-5 干簧管继电器

11.2.2 工作原理

1. 干簧管的工作原理

干簧管工作原理如图 11-6 所示。

当干簧管未加磁场时，内部两个簧片不带磁性，处于断开状态。若将磁铁靠近干簧管，内部两个簧片被磁化而带上磁性，一个簧片磁性为 N，另一个簧片磁性为 S，两个簧片磁性相异产生吸引，从而使两簧片的触点接触。

2. 干簧管继电器的工作原理

干簧管继电器工作原理如图 11-7 所示。

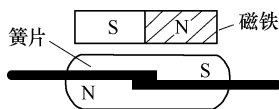


图 11-6 干簧管的工作原理

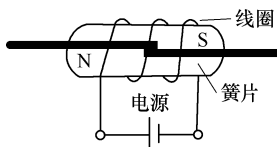


图 11-7 干簧管继电器的工作原理

当干簧管继电器线圈未加电压时，内部两个簧片不带磁性，处于断开状态。若给干簧管继电器线圈加电压，线圈产生磁场，线圈的磁场将内部两个簧片磁化而带上磁性，一个簧片磁性为 N，另一个簧片磁性为

S，两个簧片磁性相异产生吸引，从而使两簧片的触点接触。

11.2.3 选用

在选用干簧管时，要注意以下事项：

- 1) 干簧管的触点类型（常开、常闭或复合触点）要符合电路需要。
- 2) 干簧管的触点电压和电流要高于电路中实际承受的电压和电流值。

11.2.4 应用

图 11-8 是一个光控开门控制电路，它可根据有无光线来起动电动机工作，让电动机驱动大门打开。图中的光控开门控制电路主要是由干簧管继电器 GHG、继电器 K_1 和安装在大门口的光敏电阻器 RG 及电动机组成。

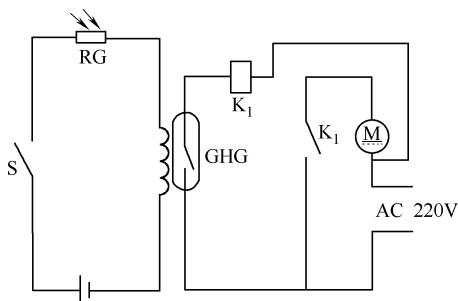


图 11-8 光控开门控制电路

在白天，将开关 S 断开，自动光控开门电路不工作。在晚上，将 S 闭合，在没有光线照射大门时，光敏电阻 RG 阻值很大，流过于簧管继电器线圈的电流很小，干簧管继电器不工作，若有光线照射大门（如汽车灯）时，光敏电阻阻值变小，流过于簧管继电器线圈的电流很大，线圈产生磁场将管内两块簧片磁化，两簧片吸引而使触点接触，有电流流过继电器 K_1 线圈，线圈产生磁场吸合常开触点 K_1 ， K_1 闭合，有电流流过电动机，电动机运转，通过传动机构将大门打开。

第 12 章

贴片元器件与集成电路

12.1 贴片元器件

12.1.1 贴片电阻器

1. 外形

贴片电阻器有矩形式和圆柱式，矩形式贴片电阻器的功率一般在 0.0315 ~ 0.125W，工作电压在 7.5 ~ 200V，圆柱式贴片电阻器的功率一般在 0.125 ~ 0.25W，工作电压在 75 ~ 100V。常见贴片电阻器如图 12-1 所示。

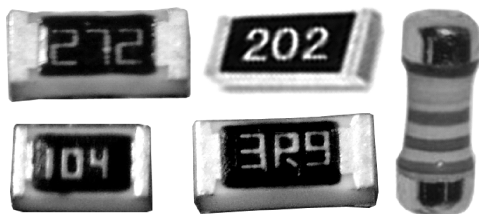


图 12-1 贴片电阻器

2. 阻值标注方法

贴片电阻器阻值表示有色环标注法，也有数字标注法。色环标注的贴片电阻器，其阻值识读方法同普通的电阻器。数字标注的贴片电阻器有 3 位和 4 位之分，对于 3 位数字标注的贴片电阻器，前 2 位表示有效数字，第三位表示 0 的个数；对于 4 位数字标注的贴片电阻器，前 3 位表示有效数字，第四位表示 0 的个数。

贴片电阻器的常见标注形式如图 12-2 所示。在生产电子产品时，贴片元件一般采用贴片机安装，为了便于机器高效安装，贴片元件通常装载在连续条带的凹坑内，凹坑由塑料带盖住并卷成盘状，图 12-3 就

是一盘贴片元件（几千个）。卷成盘状的贴片电阻器通常会在盘体标签上标明元件型号和有关参数。

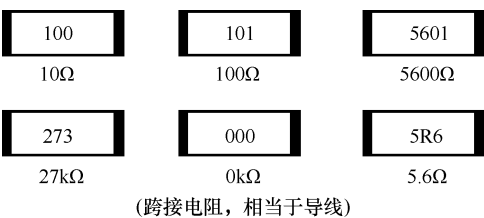


图 12-2 贴片电阻器的常见标注形式



图 12-3 盘状包装的贴片电阻器

贴片电阻器各项标注的含义见表 12-1。

表 12-1 贴片电阻器各项标注的含义

产品代号		型号		电阻温度系数		阻 值		电阻值偏差		包装方法	
RC	片状电阻器	代号	型号	代号	T. C. R	表示方式	阻 值	代号	偏差值	代号	包装方式
		02	0402	K	$\leq \pm 100 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	E-24	前两位表示有效数字 第三位表示零的个数	F	$\pm 1\%$	T	编带包装
		03	0603	L	$\leq \pm 250 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$			G	$\pm 2\%$		
		05	0805	U	$\leq \pm 400 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	E-96	前三位表示有效数字 第四位表示零的个数	J	$\pm 5\%$	B	塑料盒散包装
		06	1206	M	$\leq \pm 500 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$			0	跨接电阻		
示例	RC	05		K		103		J			
备注	小数点用 R 表示 例如：E-24：1R0 = 1.0Ω 103 = 10kΩ E-96：1003 = 100kΩ；跨接电阻采用“000”表示										

3. 尺寸规格

根据外形尺寸不同，片状电阻分成 7 个规格，分别是 0402（1005）、0603（1608）、0805（2012）、1206（3216）、1210（3225）、2010（5025）和 2512（6432）。片状电阻尺寸代码由 4 个数组成，有英制及米制两种表示方法，片状电阻规格常用英制代码表示，1in（英寸）≈ 2.54cm，以 0805（2012）为例，08 表示 0.08in（长）、05 表示 0.05in（宽），其对应的米制代码为 2012（长 2.0mm，宽 1.2mm）。目前 0603、0805 用得最多，0402 用得较多，有些厂家用英制代码的后两位数表示，如 03、05、06 分别表示 0603、0805、1206 规格。

一般来说，元件的尺寸越大，其功率更大，耐压也更高。表 12-2 列出了 7 种规格片状电阻器的额定功率、最大工作电压和工作温度。

表 12-2 7 种规格片状电阻器的额定功率和最大工作电压

尺寸代码	额定功率 /W	最大工作电压/V	工作温度/℃	尺寸代码	额定功率 /W	最大工作电压/V	工作温度/℃
0402	1/20(1/16)	50	- 55 ~ 125 (额定工作温度 70℃)	1210	1/4	200	- 55 ~ 125 (额定工作温度 70℃)
0603	1/16	50		2010	1/2	200	
0805	1/10	150		2512	1	200	
1206	1/8	200					

4. 贴片电位器

贴片电位器是一种阻值可以调节的元件，体积小巧不带手柄，贴片电位器的功率一般在 0.1 ~ 0.25W，其阻值标注方法与贴片电阻器相同。常见的贴片电位器如图 12-4 所示。

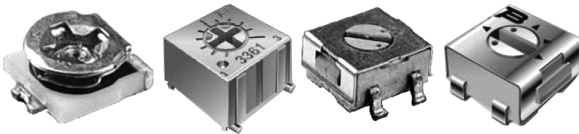


图 12-4 常见的贴片电位器



12.1.2 贴片电容器

1. 外形

贴片电容器可分为无极性电容器和有极性电容器（电解电容器）。

图 12-5 是一些常见的贴片电容器。

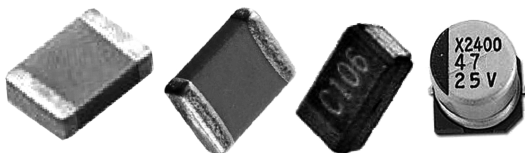


图 12-5 贴片电容器

2. 容量标注方法

贴片电容器的体积较小，故有很多电容器不标注容量，对于这类电容器，可用电容表测量，或者查看包装上的标签来识别容量。也有些贴片电容器对容量进行标注，贴片电容器常见的方法有数字标注法、字母与数字标注法、颜色与数字标注法。

(1) 数字标注法 数字标注法的贴片电容器容量识别方法与贴片电阻器相同，对于无极性贴片电器的单位为 pF ，有极性贴片电容器的单位为 μF 。

(2) 字母与数字标注法 字母与数字标注法是采用英文字母与数字组合的方式来表示容量大小。这种标注法中的第一位用字母表示容量的有效数，第二位用数字表示有效数后面 0 的个数。字母与数字标注法的字母和数字含义见表 12-3。

图 12-6 中的几个贴片电容器就采用了字母与数字混合标注法，标注“B2”表示容量为 110pF ，标注“S3”表示容量为 4700pF 。

(3) 颜色与字母标注法 颜色与字母标注法是采用颜色和一位字母来标注容量大小，采用这种方法标注的容量单位为 pF 。例如蓝色与 J，表示容量为 220pF ，红色与 S，表示容量为 9pF 。颜色与字母标注法的颜色与字母组合代表的含义见表 12-4。



图 12-6 采用字母与数字混合标注的贴片电容器

表 12-3 字母与数字标注法的含义

第一位：字母				第二位：数字	
A	1	N	3.3	0	10 ⁰
B	1.1	P	3.6	1	10 ¹
C	1.2	Q	3.9	2	10 ²
D	1.3	R	4.3	3	10 ³
E	1.5	S	4.7	4	10 ⁴
F	1.6	T	5.1	5	10 ⁵
G	1.8	U	5.6	6	10 ⁶
H	2.0	V	6.2	7	10 ⁷
I	2.2	W	6.8	8	10 ⁸
K	2.4	X	7.5	9	10 ⁹
L	2.7	Y	9.0		
M	3.0	Z	9.1		

表 12-4 颜色与字母标注法的颜色与字母组合代表的含义

	A	C	E	G	J	L	N	Q	S	U	W	Y
黄色	0.1											
绿色	0.01		0.015		0.022		0.033		0.047	0.056	0.068	0.082
白色	0.001		0.0015		0.0022		0.0033		0.0047	0.0056	0.0068	
红色	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
黑色	10	12	15	18	22	27	33	39	47	56	68	82
蓝色	100	120	150	180	220	270	330	390	470	560	680	820



12.1.3 贴片电感器

1. 外形

贴片电感器功能与普通电感器相同，图 12-7 是一些常见的贴片电感器。

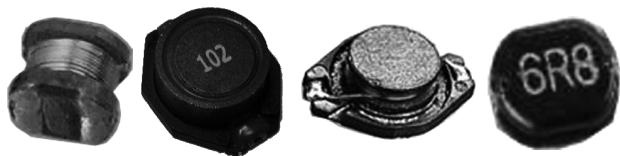


图 12-7 贴片电感器

2. 电感量的标注方法

贴片电感器的电感量一般会标注出来，其标注方法与贴片电阻器基本相同，单位为 μH 。常见贴片电感器标注形式如图 12-8 所示。

100	101	5R6	2.2 μH
10 μH	100 μH	5.6 μH	2.2 μH

图 12-8 常见贴片电感器标注形式

12.1.4 贴片二极管

1. 外形

贴片二极管有矩形和圆柱形，矩形贴片二极管一般为黑色，其使用更为广泛，图 12-9 是一些常见的贴片二极管。

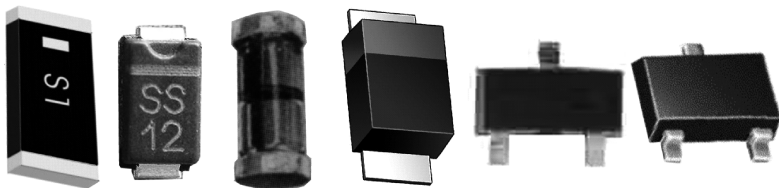


图 12-9 贴片二极管

2. 结构

贴片二极管有单管和对管之分，单管式贴片二极管内部只有一个二极管，而对管式贴片二极管内部有两个二极管。

单管式贴片二极管一般有两个端极，标有白色横条的为负极，另一端为正极，也有些单管式贴片二极管有三个端极，其中一个端极为空，其内部结构如图 12-10 所示。

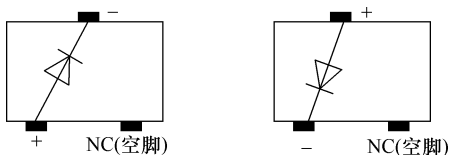


图 12-10 贴片二极管的内部结构

对管式贴片二极管根据内部两个二极管的连接方式不同，可分为共阳极对管（两个二极管正极共用）、共阴极对管（两个二极管负极共用）和串联对管，如图 12-11 所示。

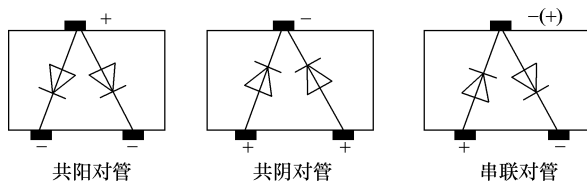


图 12-11 双管式贴片二极管的内部结构

12.1.5 贴片晶体管

1. 外形

图 12-12 是一些常见的贴片晶体管实物外形。

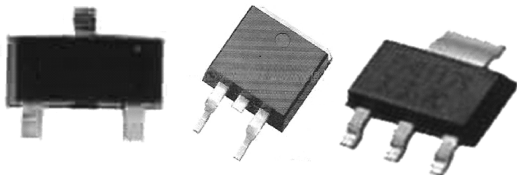


图 12-12 贴片晶体管

2. 结构

贴片晶体管有 c、b、e 三个端极，对于图 12-13a 所示单列贴片晶体管，正面朝上，粘贴面朝下，从左到右依次为 b、c、e 极。对于图 12-13b 所示双列贴片晶体管，正面朝上，粘贴面朝下，单端极为 c 极，双端极左为 b 极，右为 e 极。

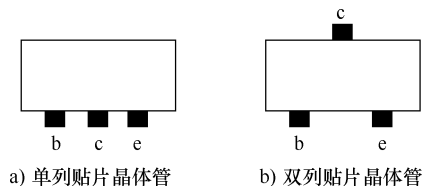


图 12-13 贴片晶体管引脚排列规律

与普通晶体管一样，贴片晶体管也有 NPN 型和 PNP 型之分，这两种类型的贴片晶体管内部结构如图 12-14 所示。

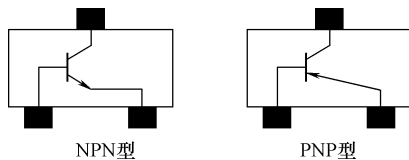


图 12-14 贴片晶体管内部结构

12.2 集成电路

12.2.1 简介

将许多电阻、二极管和晶体管等元器件以电路的形式制作在半导体硅片上，然后接出引脚并封装起来，就构成了集成电路。集成电路简称为集成块，又称芯片 IC，图 12-15a 所示的 LM380N 就是一种常见的音频放大集成电路，其内部电路如图 12-15b 所示。

由于集成电路内部结构复杂，对于大多数人来说，可不用了解内部电路具体结构，只需知道集成电路的用途和各引脚的功能。

单独集成电路是无法工作的，需要给它加接相应的外围元器件并提



a) 实物外形

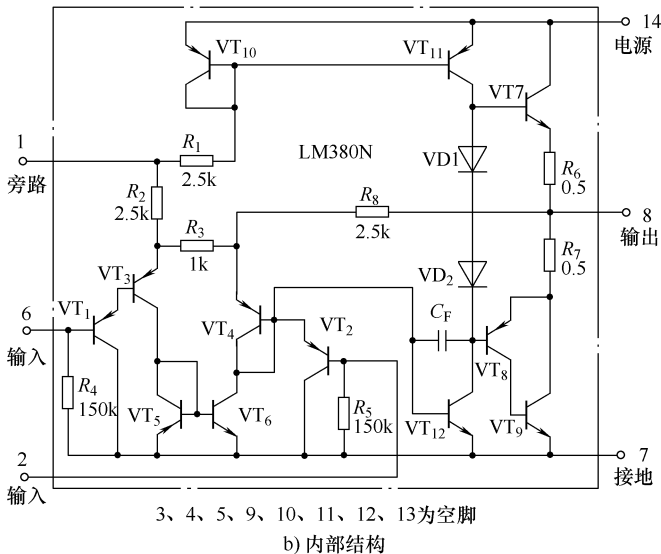


图 12-15 LM380N 集成电路

供电源才能工作。图 12-16 中的集成电路 LM380N 提供了电源并加接了外围元器件，它就可以对 6 脚输入的音频信号进行放大，然后从 8 脚输出放大的音频信号，再送入扬声器使之发声。

12.2.2 特点

有的集成电路内部只有十几个元器件，而有些集成电路内部则有上千万个元器件（如电脑中的微处理器 CPU）。集成电路内部电路很复杂，对于大多数电子技术人员可不用理会内部电路原理，除非是从事电路设计工作的。

集成电路主要有以下特点：

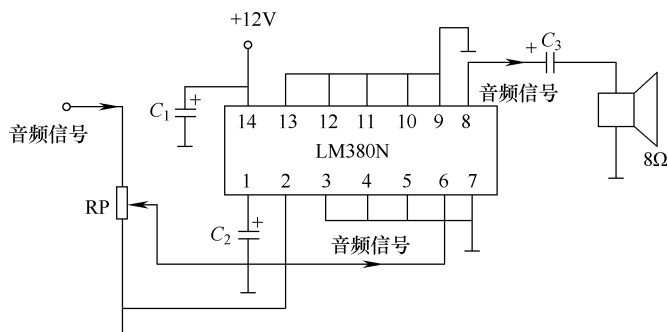


图 12-16 LM380N 构成的实用电路

1) 集成电路中多用晶体管，少用电感、电容和电阻，特别是大容量的电容器，因为制作这些元器件需要占用大面积硅片，导致成本提高。

2) 集成电路内的各个电路之间多采用直接连接（即用导线直接将两个电路连接起来），少用电容连接，这样可以减少集成电路的面积，又能使它适用各种频率的电路。

3) 集成电路内多采用对称电路（如差动电路），这样可以纠正制造工艺上的偏差。

4) 集成电路一旦生产出来，内部的电路便无法更改，不像分立元器件电路可以随时改动，所以当集成电路内的某个元器件损坏时只能更换整个集成电路。

5) 集成电路一般不能单独使用，需要与分立元器件组合才能构成实用的电路。对于集成电路，大多数电子技术人员只要知道它内部具有什么样功能的电路，即了解内部结构方框图和各脚功能就行了。

12.2.3 种类

集成电路的种类很多，其分类方式也很多，这里介绍几种主要分类方式：

1) 按集成电路所体现的功能来分，可分为模拟集成电路、数字集成电路、接口电路和特殊电路 4 类。

2) 按有源器件类型不同，集成电路又可分为双极型、单极型及双极-单极混合型 3 种。

双极型集成电路内部主要采用二极管和晶体管。它又可以分为 DTL (二极管-晶体管逻辑)、TTL (晶体管-晶体管逻辑)、ECL (发射极耦合逻辑、电流型逻辑)、HTL (高抗干扰逻辑)和 I^2L (集成注入逻辑) 电路。双极型集成电路开关速度快,频率高,信号传输延迟时间短,但制造工艺较复杂。

单极型集成电路内部主要采用 MOS 场效应晶体管。它又可分为 PMOS、NMOS 和 CMOS 电路。单极性集成电路输入阻抗高,功耗小,工艺简单,集成密度高,易于大规模集成。

双极-单极混合型集成电路内部采用 MOS 和双极兼容工艺制成,因而兼有两者的优点。

3) 按集成电路的集成度来分,可分为小规模集成电路 (SSI)、中规模集成电路 (MSI)、大规模集成电路 (LSI) 和超大规模集成电路 (VLSI)。

对于数字集成电路来说,小规模集成电路是指集成度为 1 ~ 12 门/片或 10 ~ 100 个元件/片的集成电路,它主要是逻辑单元电路,如各种逻辑门电路、集成触发器等。

中规模集成电路是指集成度为 13 ~ 99 门/片或 100 ~ 1000 个元件/片的集成电路,它是逻辑功能部件,例如编码器、译码器、数据选择器、数据分配器、计数器、寄存器、算术逻辑运算部件、A-D 和 D-A 转换器等。

大规模集成电路是指集成度为 100 ~ 1000 门/片或 1000 ~ 100000 个元件/片的集成电路,它是数字逻辑系统,如微型计算机使用的中央处理器 (CPU),存储器 (ROM、RAM) 和各种接口电路 (PIO、CTC) 等。

超大规模集成电路是指集成度大于 1000 门/片或 10^5 个元件/片的集成电路,它是高集成度的数字逻辑系统,如各种型号的单片机,就是在一处硅片上集成了一个完整的微型计算机。

对于模拟集成电路来说,由于工艺要求高,电路又复杂,故通常将集成 50 个以下的元器件的集成电路称为小规模集成电路,集成 50 ~ 100 个元器件的集成电路称为中规模集成电路,集成 100 个以上的就称作大规模集成电路。

12.2.4 引脚识别

集成电路的引脚很多,少则几个,多则几百个,各个引脚功能又不

一样，所以在使用时一定要对号入座，否则集成电路不工作甚至烧坏。因此一定要知道集成电路引脚的识别方法。

不管什么集成电路，它们都有一个标记指出第一脚，常见的标记有小圆点、小突起、缺口、缺角，找到该脚后，逆时针依次为 2、3、4…，如图 12-17a 所示。对于单列或双列引脚的集成电路，若表面标有文字，识别引脚时正对标注文字，文字左下角为第 1 引脚，然后逆时针依次为 2、3、4…，如图 12-17b 所示。

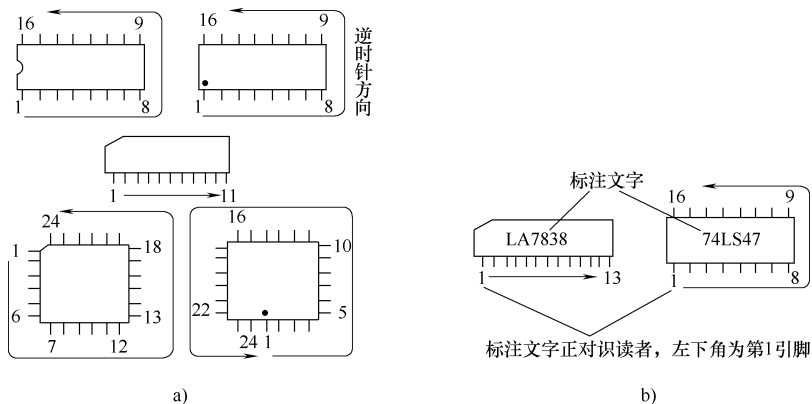


图 12-17 集成电路引脚识别

12.2.5 集成电路的型号命名方法

我国国家标准（国标）规定的半导体集成电路型号命名法由 5 部分组成，具体见表 12-5。

例如：

$$\begin{array}{cccccc} \text{C} & \text{T} & 4 & 020 & \text{M} & \text{D} \\ (1) & (2) & (3) & (4) & (5) & (6) \end{array}$$

第一部分 (1) 表示国家标准。

第二部分 (2) 表示 TTL 电路。

第三部分 (3) 表示系列品种代号。其中 1：标准系列，同国际 54/74 系列；2：高速系列，同国际 54H/74H 系列；3：肖特基系列，同国际 54S/74S 系列；4：低功耗肖特基系列，同国际 54LS/74LS 系列。(4) 表示品种代号，同国际一致。

表 12-5 国家标准集成电路型号命名方法及含义

第一部分 用字母表示器件符合国家标准		第二部分 用字母表示器件类型		第三部分 用阿拉伯数字表示器件的系列和品种代号	第四部分 用字母表示器件的工作温度范围/℃		第五部分 用字母表示器件的封装	
符号	意义	符号	意义	TTL 分为	符号	意义	符号	意义
C	中国制造	T	TTL	54/74 × × ×	C	0 ~ 70	W	陶瓷扁平
		H	HTL	54/74H × × ×	E	- 40 ~ 85	B	塑料扁平
		E	ECL	54/74L × × ×	R	- 55 ~ 85	F	全密封扁平
		C	CMOS	54/74LS × × ×	M	- 55 ~ 125	D	陶瓷直插
		F	线性放大器	54/74ALS × × ×	G	- 25 ~ 70	P	塑料直插
		D	音响、电视电路	54/74F × × ×	L	- 25 ~ 85	J	黑陶瓷直插
		W	稳压器	CMOS 分为 4000 系列			L	金属菱形
		J	接口电路	54/74HC × × ×			T	金属圆形
		B	非线性电路	54/74HCT × × ×			H	黑瓷低熔点玻璃
		M	存储器					
		S	特殊电路					
		AD	模-数转换器					
		DA	数-模转换器					

第四部分（5）表示工作温度范围。C：0 ~ 70℃，同国际 74 系列电路的工作温度范围；M：- 55 ~ 125℃，同国际 54 系列电路的工作温度范围。

第五部分（6）表示封装形式为陶瓷双列直插。

国家标准型号的集成电路与国际通用或流行的系列品种相仿，其型号主干、功能、电特性及引出脚排列等均与国外同类品种相同，因而品种代号相同的产品可以互相代用。

常用晶体管的性能参数及用途

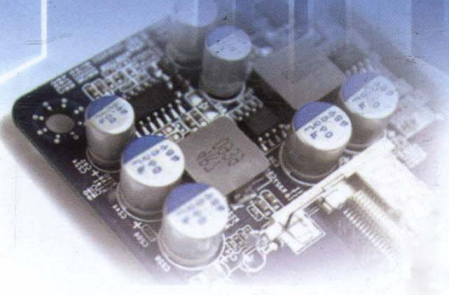
型 号	材料与 极性	P_{CM} /W	I_{CM} /mA	BU_{CEO} /V	f_T /MHz	h_{FE}	主 要 用 途
9011	硅 NPN	0.4	30	30	370	28 ~ 180	通用型，可 作 为 高放
9012	硅 PNP	0.625	500	20		64 ~ 202	1W 输出，可作为功 率放大
9013	硅 NPN		500	20			
9014			100	45	270	60 ~ 1000	
9015	硅 PNP	0.45	100	45	190	60 ~ 600	
9016	硅 NPN	0.4	25	20	620	28 ~ 198	低噪声，高频放大， 振荡
9018			50	15	1100		
8050	硅 NPN	1	1.5 A	25	190	85 ~ 300	高频功率放大
8055	硅 PNP		1.5 A	25	200	60 ~ 300	
2N3903	硅 NPN	0.625	200	40	> 250		通用型，与 3DK4B 管对应
2N3904					> 300		
2N3905	硅 PNP			40	> 200		通用型，与 3DK3F 管对应
2N3906					> 250		
2N4124	硅 NPN	0.625	200	25	300		同 3DK40A
2N4401			600	40	> 250		同 3DK4B
2N5401	硅 PNP			150	> 100		放大，可作为视放
2N5551	硅 NPN			160			
2N6515			500	250	> 40		高反压管
2SA708	硅 PNP	0.8	700	60	50	150	低放，中速开关
2SA733		0.25	150	50	180	200	通用，高、低放
2SA928A		1	2A	30	120		功率放大

(续)

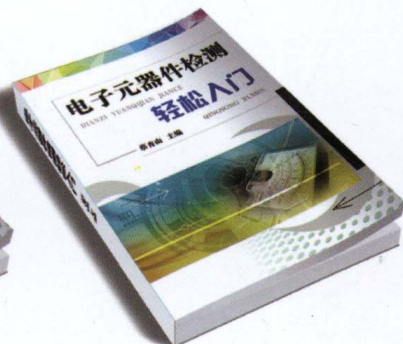
型 号	材料与 极性	P_{CM} /W	I_{CM} /mA	BU_{CEO} /V	f_T /MHz	h_{FE}	主 要 用 途
2SC388A	硅 NPN	0.3	50	25	>300	20~200	高放, 图像中放
2SC815		0.4	200	45	200	80	高放, 中放振荡
2SC945		0.25	250	50	300	200	通用, 高放振荡
2SC1008		0.8	700	60	50	150	放大, 中速开关
2SC1187	硅 NPN	0.25	30	20	700	90	高放, 图像中放
2SC1393A			20	30		100	低噪高放
2SC1674				20	600	90	高放, 振荡混频
2SC1730			50	15	1100	100	VHF/UHF 振荡
2SC2310		0.2	200	150	230	100~320	低噪高放
2SC2330		70	6A			60	功率放大
2SC2383		0.9	1A	160	>20	60~320	功率放大, 场输出
2SC2500			2A	10	150	140~600	闪光灯专用
2SD471A	硅 NPN	0.8	1A	30	130	200	功率放大
MPS2222		0.625	600	30	>250		通用型, 高放
MPS2907			600	40	>200		
MPS5179		0.2	50	12	900		高频放大
MPSA42		0.625	500	300	>50		高压放大
MPSA92			500	300	>50		
2SA473	硅 PNP	10	3A	30	100	70~240	功率放大
2SA614		15	1A	55	30	80	功率放大, 稳流
2SA634		10	3A	30	55	100	功率放大
2SA940		25	1.5A	150	4	75	场输出, 放大
2SB540	锗 PNP	6	2A	50	5	120	场输出, 功放
2SB596		30	4A	80	>3	40~240	功率放大

(续)

型 号	材料与 极性	P_{CM} /W	I_{CM} /mA	BU_{CEO} /V	f_T /MHz	h_{FE}	主 要 用 途
2SB708	硅 PNP	40	7 A	80		40 ~ 200	功 率 放 大，中 速 开 关
2SB834		30	3 A	60	9	100	
2SC1096	硅 NPN	10	3 A	30	65	60	功率放大
2SC1173					100	70 ~ 240	
2SC1507		15	200	300	80	80	
2SC1520		10		250			
2SC2073		25	1.5 A	150	4	75	
2SC2688	硅 NPN	10	200	300	80	40 ~ 250	功率放大
2SD288		25	3 A	55	35	100	功率放大，稳流
2SD362		40	5 A	150	10	45	功 率 放 大，开 关 电 路
2SD363		200	30 A	250		30	功率放大
2SD401		20	2 A	200	5	90	功率放大，场输出
2SD526		30	4 A	80	8	40 ~ 240	功率放大
2SD888		50	6 A	80		1000	功率放大



DIANZI YUANQIJIAN XUANYONG QINGSONG RUMEN



地址:北京市百万庄大街22号
 邮政编码:100037

电话服务

社服务中心: 010-88361066

销售一部: 010-68326294

销售二部: 010-88379649

读者购书热线: 010-88379203

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

机工微博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

上架指导 工业技术 / 电子技术

ISBN 978-7-111-44391-9

策划编辑◎徐明煜/ 封面设计◎赵颖喆

ISBN 978-7-111-44391-9



9 787111 443919

定价: 20.00元